

Humboldt-Universität zu Berlin

Dissertation

**Einfluss eines differenzierten Wasserangebotes auf
Wurzelwachstum und Reservekohlen-
hydrathaushalt von Bleichspargel
(*Asparagus officinalis* L.)**

Zur Erlangung des akademischen Grades
Doctor rerum horticumarum
(Dr.rer.hort.)

eingereicht an der

Landwirtschaftlich-Gärtnerischen Fakultät
der Humboldt-Universität zu Berlin

von

Dipl.-Ing. (FH) Sebastian Weinheimer
geboren am 30.01.1978 in Landau/Pfalz

Dekan: Prof. Dr. Dr. h.c. Otto Kaufmann

Gutachter: 1. Doz. Dr. sc. Drs. h.c. Michael Böhme

2. Prof. Dr. habil. Peter-J. Paschold

Eingereicht: 10. März 2008

Disputation: 09. Mai 2008

Zusammenfassung/Kurzfassung

Sebastian Weinheimer: Einfluss eines differenzierten Wasserangebotes auf Wurzelwachstum und Reservekohlenhydrathaushalt von Bleichspargel (*Asparagus officinalis* L.)

Schlagworte: Spargel, Wurzelwachstum, WLD, Reservekohlenhydrate, Bewässerung

Durch den in den letzten Jahren in Deutschland stark ausgeweiteten Spargelanbau wird der Kostendruck auf die Erzeuger immer größer. Um eine Spargelfläche ökonomisch erfolgreich zu bewirtschaften sind Anbauempfehlungen die auf einer objektiven Grundlage beruhen unersetzlich. Eine Möglichkeit hierzu ist das Messen der Reservekohlenhydratkonzentration (RKH-Konzentration) in den Speicherwurzeln. Ein sehr großer Nachteil dieser Methode ist, dass die Speicherwurzelmasse, die einen erheblichen Einfluss auf die verfügbare Gesamtmenge an Reservekohlenhydraten hat unberücksichtigt bleibt. Hinsichtlich der Wurzelmasse und der Wurzelverteilung im Boden bestanden bislang große Wissenslücken.

Um den Einfluss der Bewässerung auf die Wurzelmasse und die Wurzelverteilung zu ermitteln, wurde ein Praxisversuch angelegt. Zu bestimmten Zeitpunkten in der Vegetationsperiode wurden Proben auf einer bewässerten und einer unbewässerten Variante entnommen. In der bewässerten Variante waren zu jedem Zeitpunkt signifikant mehr Speicherwurzeln vorhanden. Auch die Speicherwurzelfrischmasse war signifikant größer. In der Tiefenverteilung unterschieden sich jedoch die Varianten nicht. Auch in Gefäßversuchen konnten diese Ergebnisse bestätigt werden. Die Faserwurzelverteilung unter Praxisbedingungen unterschied sich jedoch erheblich von der Speicherwurzelverteilung. In der bewässerten Variante war der Boden im untersuchten Profil komplett mit Faserwurzeln durchwachsen, während in der unbewässerten Variante die Faserwurzeln lediglich in den oberen Bodenschichten zu finden waren. In Gefäßversuchen durchwurzelten die Faserwurzeln unabhängig von der Bewässerungssteuerung das gesamte Bodenvolumen.

Unter mehrjährigen Praxisbedingungen lag die RKH-Konzentration in der unbewässerten Variante immer über der Konzentration in der bewässerten Variante. Die Gesamtmenge an RKH lag jedoch aufgrund der größeren Speicherwurzelmasse in der bewässerten Variante höher. Daher muss bei der Verwendung der RKH-Methode als Steuerinstrument im Spargelanbau unbedingt auch die Speicherwurzelmasse berücksichtigt werden.

Abstract

Sebastian Weinheimer: Influence of differentiated water supply on root-growth and storage-carbohydrate budget of bleached asparagus (*Asparagus officinalis* L.)

Keywords: asparagus, root-growth, RLD, storage carbohydrates, irrigation

The cultivation of asparagus in Germany has strongly expanded over the last years. Hence the cost pressure is increasing vastly on the producers. For the cultivation of asparagus, impartial cultivation recommendations are necessary. One possibility is measuring the carbohydrate concentration (CHO-concentration) in the storage roots. A great disadvantage of this method is that the root mass, which has a substantial influence on the total quantity of available carbohydrates, remains unconsidered. Regarding to the root mass and the distribution of roots in the soil so far large gaps in the grower's knowledge are existent.

In order to determine the influence of the irrigation on the root mass and the distribution of roots, a trial was prepared. Samples of a watered and an unwatered variant were taken at certain points in the vegetation period. In the watered variant were significantly more storage roots were present at each time. Further the storage root fresh mass was significantly bigger. However, in the vertical distribution the variants did not differ, which could also be confirmed in container trials. The distribution of fibre roots under practical conditions did indeed differ substantially from the storage root distribution. In the watered variant the soil profile was completely filled with fibre roots, whereas in the unwatered variant the fibre roots were only found in the upper soil layer. In container trials the fibre roots were distributed throughout the entire soil volume independently of the irrigation control.

Under practical conditions the CHO concentration was always higher for the unwatered variant compared to the watered variant. However, the total quantity of CHO was higher in the watered variant due to the larger storage root mass. Therefore the storage root mass has to be considered when using the CHO method as an instrument in the cultivation of asparagus.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Kenntnisstand	4
1.1.1	Wachstumsdynamik	4
1.1.1.1	Triebwachstum.....	4
1.1.1.2	Ertragsbildung	5
1.1.1.3	Speicherwurzelwachstum.....	6
1.1.1.4	Rhizomwachstum	8
1.1.1.5	Faserwurzelwachstum	8
1.1.2	Reservekohlenhydrathaushalt	9
1.1.3	Ausgewählte Wurzelparameter	10
1.1.4	Wachstumsmodelle	11
1.2	Zielsetzung und Aufgabenstellung	12
2	Material und Methoden.....	14
2.1	Versuchsprogramm.....	14
2.2	Allgemeine Informationen	15
2.2.1	Pflanzmaterial.....	15
2.2.2	Witterungsverlauf in Geisenheim der Jahre 2005 bis 2007	15
2.2.3	Witterungsverlauf der Praxisversuchsfläche.....	18
2.2.4	Standortbeschreibung des Praxisversuchs	18
2.3	Bewässerung und Bewässerungssteuerung	19
2.4	Temperaturmessung	20
2.5	Pflanzsubstrat	21
2.6	Düngung	21
2.7	Beschreibung der Versuchsanlagen	22
2.8	Bestimmung der Reservekohlenhydratgehalte	23
2.9	Bestimmung der Wurzelmerkmale	25
2.10	Erstellung der Verteilungsgraphiken	27
2.11	Berechnung der Gesamtwurzellänge je Einzelpflanze	28

2.12	Bestimmung der Wurzel- und Rhizommasse ganzer Pflanzen	28
2.13	Ertragserfassung der Praxisversuchsfläche	28
2.14	Bestimmung der Lagerungsdichte	28
2.15	Bestimmung sonstiger Merkmale	29
2.16	Wachstumsverläufe in den Gitterboxen	30
2.17	Berechnung des RKH-Gehaltes	31
2.18	Statistische Auswertung	31
3	Ergebnisse	32
3.1	Verlauf der Bodenfeuchte im Praxisversuch	32
3.2	Einfluss des Wasserangebotes auf das Triebwachstum	34
3.2.1	Praxisfläche	34
3.2.1.1	Triebmerkmale	34
3.2.1.2	Verlauf der Abreife des Aufwuchses	35
3.2.2	Gitterboxen	38
3.2.2.1	Triebmerkmale	38
3.2.2.2	Verlauf der Abreife des Aufwuchses	39
3.2.2.3	Wachstumsmodell	40
3.3	Einfluss des Wasserangebotes auf den Ertrag unter Praxisbedingungen	43
3.4	Einfluss der Bewässerung auf das Speicherwurzelwachstum	44
3.4.1	Praxisfläche	44
3.4.1.1	Wurzellängendichte (WLD) der Speicherwurzeln	44
3.4.1.2	Wurzeltrockenmassendichte (WTMD) der Speicherwurzeln	48
3.4.1.3	Speicherwurzeldurchmesser	48
3.4.1.4	Mittlerer-halber-Wurzelabstand (mhWa) der Speicherwurzeln	49
3.4.1.5	Spezifische Wurzellänge (SWL) der Speicherwurzeln	50
3.4.1.6	Speicherwurzeltrockensubstanz	51
3.4.1.7	Gesamt-Speicherwurzellänge je Pflanze	51
3.4.1.8	Zusammenhang der Speicherwurzelmerkmale	54

3.4.2	Ganze Pflanzen	54
3.4.2.1	Speicherwurzelfrischmasse.....	54
3.4.2.2	Speicherwurzeltrockenmasse	55
3.4.3	Zusammenhang zwischen Wurzelmerkmalen aus Bohrstockproben und aus vollständig ausgegrabenen Pflanzen	56
3.4.4	Gitterboxen	57
3.4.4.1	Speicherwurzelmerkmale	57
3.4.4.2	Wurzelwachstumsmodell.....	59
3.5	Einfluss des Wasserangebotes auf das Rhizomwachstum	61
3.5.1	Praxisfläche	61
3.5.1.1	Rhizomfrischmasse	61
3.5.1.2	Rhizomtrockenmasse.....	62
3.5.1.3	Rhizomtrockensubstanz	63
3.5.2	Gitterboxen	63
3.6	Einfluss des Wasserangebotes auf das Faserwurzelwachstum.....	64
3.6.1	Praxisfläche	64
3.6.1.1	Wurzellängendichte (WLD) der Faserwurzeln.....	64
3.6.1.2	Wurzeltrockenmassendichte (WTMD) der Faserwurzeln.....	66
3.6.1.3	Faserwurzeldurchmesser	67
3.6.1.4	Mittlerer-halber-Wurzelabstand (mhWa) der Faserwurzeln.....	68
3.6.1.5	Spezifische Wurzellänge (SWL) der Faserwurzeln	68
3.6.1.6	Faserwurzeltrockensubstanz (TS).....	69
3.6.1.7	Gesamt-Faserwurzellänge je Pflanze	69
3.6.1.8	Zusammenhang der Faserwurzelmerkmale	70
3.6.2	Gitterboxen	71
3.6.2.1	Faserwurzelmerkmale	71
3.6.2.2	Wachstumsmodell.....	73
3.7	Lagerungsdichte des Bodens der Praxisversuchsfläche	75
3.8	Einfluss des Wasserangebotes auf die RKH-Konzentration	76

3.8.1	Praxisfläche.....	76
3.8.2	Gitterboxen.....	78
3.9	Einfluss der Bewässerung auf den Gesamtgehalt an wasserlöslichen Reservekohlenhydraten.....	79
3.9.1	Praxisfläche.....	79
3.9.2	Gitterboxen.....	80
3.10	Verbrauch von RKH für Aufwuchs und Ertrag.....	80
4	Diskussion	82
4.1	Einfluss der Bewässerung auf Triebwachstum	82
4.1.1	Zeitlicher Verlauf des Triebwachstums in den Gitterboxen.....	85
4.2	Einfluss der Bewässerung auf den Ertrag	85
4.3	Einfluss der Bewässerung auf das Speicherwurzelwachstum	87
4.3.1	Zeitlicher Verlauf des Speicherwurzelwachstums in den Gitterboxen.....	94
4.4	Einfluss der Bewässerung auf das Rhizomwachstum.....	95
4.5	Einfluss der Bewässerung auf das Faserwurzelwachstum	96
4.5.1	Zeitlicher Verlauf des Faserwurzelwachstums in den Gitterboxen.....	103
4.6	Lagerungsdichte	103
4.7	Einfluss der Bewässerung auf die Reservekohlenhydratkonzentration.....	105
4.8	Verbrauch von RKH zur Bildung des Ertrages und des Aufwuchses.....	106
5	Schlussfolgerungen.....	109
5.1	Empfehlungen für die weitere Forschung	109
5.2	Empfehlungen für die Praxis	110
5.3	Beurteilung der Arbeitshypothesen	111
6	Literaturverzeichnis	113

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Junge Spargelpflanze mit neuen Speicherwurzeln (weiße Färbung), Faserwurzeln, jungen Rhizomteilen und einer ausgetriebenen Knospe.	1
Abbildung 2: Monatsmitteltemperatur, Monatssumme der Niederschläge des Versuchsjahres 2005 und das langjährige Mittel (1971-2000). Quelle: DWD 2007	16
Abbildung 3: Monatsmitteltemperatur, Monatssumme der Niederschläge des Versuchsjahres 2006 und das langjährige Mittel (1971-2000). Quelle: DWD 2007	17
Abbildung 4: Monatsmitteltemperatur, Monatssumme der Niederschläge des Versuchsjahres 2007 und das langjährige Mittel (1971-2000). Quelle: DWD 2007	17
Abbildung 5: Aufbau der Gitterboxen zur Beobachtung des Wurzelwachstums im Querschnitt.	23
Abbildung 6: Entnahmeschema der mit einem Bohrstock entnommenen Wurzelproben.	26
Abbildung 7: Verlauf der Bodensaugspannung [-hPa], der Bewässerungsmenge [mm] und der Niederschlagsmenge [mm] während der Bewässerungsperiode 2005 im Praxisversuch.	33
Abbildung 8: Verlauf der Bodensaugspannung [-hPa], der Bewässerungsmenge [mm] und der Niederschlagsmenge [mm] während der Bewässerungsperiode 2006 im Praxisversuch.	33
Abbildung 9: Verlauf der Bodensaugspannung [-hPa], der Bewässerungsmenge [mm] und der Niederschlagsmenge [mm] während der Bewässerungsperiode 2007 im Praxisversuch.	34
Abbildung 10: Anteile der Phyllokladien mit unterschiedlicher Färbung der bewässerten Pflanzen im Praxisversuch 2005.	36
Abbildung 11: Anteile der Phyllokladien mit unterschiedlicher Färbung der unbewässerten Pflanzen im Praxisversuch 2005.	36
Abbildung 12: Anteile der Phyllokladien mit unterschiedlicher Färbung der bewässerten Pflanzen im Praxisversuch 2006.	37
Abbildung 13: Anteile der Phyllokladien mit unterschiedlicher Färbung der unbewässerten Pflanzen im Praxisversuch 2006.	37
Abbildung 14: Anteile der Phyllokladien mit unterschiedlicher Färbung der feucht kultivierten Pflanzen im Gitterboxversuch 2006.	39
Abbildung 15: Anteile der Phyllokladien mit unterschiedlicher Färbung der trocken kultivierten Pflanzen im Gitterboxversuch 2006.	40

Abbildung 16: Gesamtrieblänge in Abhängigkeit der Temperatursumme der Luft in den Gitterboxen des Jahres 2005. Parameter und Bestimmtheitsmaß der Funktion siehe Tabelle 7.	41
Abbildung 17: Gesamtrieblänge in Abhängigkeit der Temperatursumme der Luft in den Gitterboxen des Jahres 2006. Parameter und Bestimmtheitsmaß der Funktion siehe Tabelle 7.	41
Abbildung 18: Gesamtrieblänge in Abhängigkeit der Temperatursumme der Luft in den Gitterboxen des Jahres 2007. Parameter und Bestimmtheitsmaß der Funktion siehe Tabelle 7.	42
Abbildung 19: Einfluss der Bewässerung auf den Rohertrag [t/ha] der Jahre 2006 und 2007 der Praxisversuchsfläche.....	44
Abbildung 20: Verteilung der mittleren Wurzellängendichte der Speicherwurzeln [mm cm^{-3}] im Bodenprofil im März 2005 bei der bewässerten Variante.....	46
Abbildung 21: Verteilung der mittleren Wurzellängendichte der Speicherwurzeln [mm cm^{-3}] im Bodenprofil im Oktober 2005 bei der bewässerten Variante.....	46
Abbildung 22: Verteilung der mittleren Wurzellängendichte der Speicherwurzeln [mm cm^{-3}] im Bodenprofil im Oktober 2005 bei der unbewässerten Variante.....	47
Abbildung 23: Berechnete Speicherwurzellänge [m/Pflanze] bewässerter und unbewässerter Spargelpflanzen. Fehlerbalken kennzeichnen Standardabweichung. Signifikanz mit F-Test (n.s.: nicht signifikant, ~: $p \leq 0,1$, *: $p \leq 0,05$, **: $p \leq 0,01$, ***: $p \leq 0,001$). n= 4 je Termin und Variante.	52
Abbildung 24: Zusammenhang zwischen mittlerer Speicherwurzelfrischmasse [g/Pflanze] und der mittleren Wurzelfrischmassendichte [mg cm^{-3}] der Speicherwurzeln. *: $p \leq 0,05$	57
Abbildung 25: Einfluss der Temperatursumme auf die Länge der Speicherwurzeln an der Plexiglasscheibe der Gitterboxen 2005. Parameter und Bestimmtheitsmaß der Funktion siehe Tabelle 19.	59
Abbildung 26: Einfluss der Temperatursumme auf die Länge der Speicherwurzeln an der Plexiglasscheibe der Gitterboxen 2006. Parameter und Bestimmtheitsmaß der Funktion siehe Tabelle 19.	60
Abbildung 27: Einfluss der Temperatursumme auf die Länge der Speicherwurzeln an der Plexiglasscheibe der Gitterboxen 2007. Parameter und Bestimmtheitsmaß der Funktion siehe Tabelle 19.	60
Abbildung 28: Verteilung der mittleren Wurzellängendichte der Faserwurzeln [mm cm^{-3}] im Bodenprofil im August 2005 bei der unbewässerten Variante.	66

Abbildung 29: Faserwurzellänge [m/Pflanze] bewässerter und unbewässerter Spargelpflanzen. Fehlerbalken kennzeichnen Standardabweichung. Signifikanzgrenzen kennzeichnen Unterschiede zwischen den Varianten. Signifikanz mit F-Test (n.s.: nicht signifikant, ~: $p \leq 0,1$, *: $p \leq 0,05$, **: $p \leq 0,01$, ***: $p \leq 0,001$).....	70
Abbildung 30: Zusammenhang zwischen ausgebrachter Wassermenge und Faserwurzeltrockenmasse im Gitterbox-Versuch (2006: n=6; 2007: n=8).	72
Abbildung 31: Einfluss der Temperatursumme auf die Länge der Faserwurzeln an der Plexiglasscheibe der Gitterboxen 2005. Parameter und Bestimmtheitsmaß der Funktion siehe Tabelle 31.	73
Abbildung 32: Einfluss der Temperatursumme auf die Länge der Faserwurzeln an der Plexiglasscheibe der Gitterboxen 2006. Parameter und Bestimmtheitsmaß der Funktion siehe Tabelle 31.	74
Abbildung 33: Einfluss der Temperatursumme auf die Länge der Faserwurzeln an der Plexiglasscheibe der Gitterboxen 2007. Parameter und Bestimmtheitsmaß der Funktion siehe Tabelle 31.	74
Abbildung 34: Gehalt an wasserlöslichen RKH im Jahresverlauf der bewässerten und unbewässerten Variante des Praxisversuchs. Je Messtermin und je Variante n = 20. Fehlerbalken symbolisieren Standardabweichung.	77
Abbildung 35: Zusammenhang zwischen Brix-Wert und dem Trockensubstanzgehalt der Speicherwurzeln (n=20).	78
Abbildung 36: Zusammenhang zwischen Wurzellängendichte der Speicherwurzeln und WLD der Faserwurzeln. Werte der Bohrstockproben auf der Praxisfläche (n=1280)	98

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Merkmale der Spargeljungpflanzen für die Gefäßversuche (Mittelwerte \pm Standardabweichung).....	15
Tabelle 2: Ergebnisse der chemischen Bodenuntersuchung des Praxisversuchs aus dem Jahr 2005.....	18
Tabelle 3: Einschaltpunkte der Bewässerung [-hPa] und die ausgebrachte Wassermengen [L] je Gefäß und je Bewässerungsvorgang, der einzelnen Versuchsjahre und der Varianten.....	20
Tabelle 4: Substratanalysen der einzelnen Versuchsjahre.....	21
Tabelle 5: Ergebnisse der Herbstbonituren der Praxisversuchsfläche (n=20 je Variante, Mittelwert je Pflanze).....	35
Tabelle 6: Wassermenge [L/Pflanze], Gesamtrieblänge [cm/Pflanze], mittlerer Triebdurchmesser [mm], Triebanzahl [St./Pflanze] und maximale Trieblänge [cm] der Gitterboxversuche (n=3 je Variante).....	38
Tabelle 7: Modellparameter des Wachstumsmodells der Gesamtrieblänge der einzelnen Jahre und Varianten ($y=p_0/(1+e^{-(x-p_1)^{p_2}})$).....	43
Tabelle 8: Wurzellängendichte [10^{-1} mm cm ⁻³] der Speicherwurzeln im Jahresverlauf mit und ohne Bewässerung. Mittelwert über den Abstand und die Tiefe (n=64 je Variante).....	45
Tabelle 9: Wurzeltrockenmassendichte [mg cm ⁻³] der Speicherwurzeln im Jahresverlauf mit und ohne Bewässerung. Mittelwert über den Abstand und die Tiefe (n=64 je Variante).....	48
Tabelle 10: Durchmesser [mm] der Speicherwurzeln im Jahresverlauf mit und ohne Bewässerung. Mittelwert über den Abstand und die Tiefe (n=64 je Variante).....	49
Tabelle 11: Mittlerer halber Wurzelabstand [cm] der Speicherwurzeln im Jahresverlauf mit und ohne Bewässerung. Mittelwert über den Abstand und die Tiefe (n=64 je Variante).....	50
Tabelle 12: Spezifische Wurzellänge [m gTM ⁻¹] der Speicherwurzeln im Jahresverlauf mit und ohne Bewässerung. Mittelwert über den Abstand und die Tiefe (n=64 je Variante).....	50
Tabelle 13: Trockensubstanz [%] der Speicherwurzeln im Jahresverlauf mit und ohne Bewässerung. Mittelwert über den Abstand und die Tiefe (n=64 je Variante).....	53
Tabelle 14: Trockensubstanz [%] der Faserwurzeln im Jahresverlauf mit und ohne Bewässerung. Mittelwert über den Abstand und die Tiefe (n=64 je Variante).....	53
Tabelle 15: Bestimmtheitsmaße (R ²) der Speicherwurzelmerkmale.....	54

Tabelle 16: Speicherwurzelfrischmasse [g/Pflanze] der komplett ausgegrabenen Pflanzen zu verschiedenen Terminen (n=8 Pflanzen je Variante).....	55
Tabelle 17: Speicherwurzeltrockenmassen [g/Pflanze] der komplett ausgegrabenen Pflanzen zu den verschiedenen Terminen (n=8 Pflanzen je Variante).....	56
Tabelle 18: Wassermenge [L/Pflanze], Frischmasse [g/Pflanze], Trockensubstanz [%], Trockenmasse [g/Pflanze], sowie die Anzahl [St./Pflanze], die durchschnittliche Länge [cm], die Gesamtlänge [cm/Pflanze] und die gemessene Länge an der Plexiglasscheibe [cm] der Speicherwurzeln der Gitterbox-Versuche (n=3 Pflanzen je Variante).	58
Tabelle 19: Modellparameter und Bestimmtheitsmaße der Wachstumskurven der Speicherwurzellänge entlang der Plexiglasscheibe ($y=p_0/(1+e^{-(x-p_1)^{p_2}})$).....	61
Tabelle 20: Rhizomfrischmassen [g/Pflanze] der komplett ausgegrabenen Pflanzen zu verschiedenen Terminen. (n=8 Pflanzen je Variante).....	62
Tabelle 21: Rhizomtrockenmassen [g/Pflanze] der komplett ausgegrabenen Pflanzen zu verschiedenen Terminen. (n=8 Pflanzen je Variante).....	62
Tabelle 22: Rhizomtrockensubstanz [%] der komplett ausgegrabenen Pflanzen zu verschiedenen Terminen. (n=8 Pflanzen je Variante).	63
Tabelle 23: Wassermenge [L/Pflanze], Frischmasse [g/Pflanze], Trockensubstanz [%], Trockenmasse [g/Pflanze], des Rhizoms sowie die Anzahl der Cluster [St./Pflanze] (n=3 Pflanzen je Variante).	64
Tabelle 24: Wurzellängendichte [mm cm^{-3}] der Faserwurzeln im Jahresverlauf mit und ohne Bewässerung. Mittelwert über den Abstand und die Tiefe (n=64 je Variante).	65
Tabelle 25: Wurzeltrockenmassendichte [mg cm^{-3}] der Faserwurzeln im Jahresverlauf mit und ohne Bewässerung. Mittelwert über den Abstand und die Tiefe (n=64 je Variante).	67
Tabelle 26: Durchmesser [mm] der Faserwurzeln im Jahresverlauf mit und ohne Bewässerung. Mittelwert über den Abstand und die Tiefe (n=64 je Variante).....	67
Tabelle 27: Mittlerer halber Wurzelabstand [cm] der Faserwurzeln im Jahresverlauf mit und ohne Bewässerung. Mittelwert über den Abstand und die Tiefe (n=64 je Variante).	68
Tabelle 28: Spezifische Wurzellänge [m gTM^{-1}] der Faserwurzeln im Jahresverlauf mit und ohne Bewässerung. Mittelwert über den Abstand und die Tiefe (n=64 je Variante).	69
Tabelle 29: Bestimmtheitsmaße der Faserwurzelmerkmale des Praxisversuches.	71
Tabelle 30: Wassermenge [L/Pflanze], Frischmasse [g/Pflanze], Trockensubstanz [%], Trockenmasse [g/Pflanze] der Faserwurzeln, sowie die Mitte September gemessene Länge an der Plexiglasscheibe [cm] der Faserwurzeln der Gitterbox-Versuche (n=3 Pflanzen je Variante).....	72

Tabelle 31: Modellparameter und Bestimmtheitsmaße der Wachstumskurven der Faserwurzellänge entlang der Plexiglasscheibe ($y=p_0/(1+e^{-(x-p_1)/p_2})$).....	75
Tabelle 32: Lagerungsdichten [g cm ⁻³] der beiden Varianten in verschiedenen Tiefen (n=8).	76
Tabelle 33: Wassermenge [l/Pflanze], Brix-Werte [°Bx], Trockensubstanzgehalte [%] der Speicherwurzeln und Gesamtmenge an RKH [g/Pflanze] aus Versuchen in Gitterboxen (n=3 (2005 und 2006) bzw. n=4 (2007); Brix-Werte: n=20).	79
Tabelle 34: Berechnete Gesamtgehalte an Reservekohlenhydraten [g/Pflanze] im Praxisversuch (n=4 je Variante)	80
Tabelle 35: Veränderung der Frisch- und Trockenmasse der Speicherwurzeln [g/Pflanze], daraus berechnetem Verlust an Trockenmasse und daraus aufgebauter Aufwuchstrockenmasse [g/Pflanze], sowie daraus berechneter Effektivität [%] (n=10 je Termin).	81
Tabelle 36: Berechnung der Effektivität der Spargelpflanzen zur Bildung des Ertrages	107

Formelverzeichnis

Formel 1: Abschätzen des mittleren-halben-Wurzelabstandes.	27
Formel 2: Gleichung zur Beschreibung der Wachstumsverläufe.....	30
Formel 3: Berechnung des Reservekohlenhydratgehaltes in den Speicherwurzeln [mg g TM ⁻¹].	31
Formel 4: Berechnung der Reservekohlenhydratmenge je Pflanze [g/Pflanze].	31

Abkürzungsverzeichnis

°Cd	Grad-Tage, Summe der Tagesmitteltemperaturen
Brix	Messwert der wasserlöslichen Trockensubstanz [°Bx]
DP	Degree of Polymerisation, Polymerisierungsgrad
FM	Frischmasse [g]
ha	Hektar
hPa	Hektopascal
HSD	Grenzdifferenz nach Tukey's Studentized Range Test
mhWa	mittlerer halber Wurzelabstand [cm]
nWK	Nutzbare Wasserkapazität [mm]
Ø	Durchschnitt
RKH	Wasserlösliche Reservekohlenhydrate
SWL	Spezifische Wurzellänge [m g TM ⁻¹]
TM	Trockenmasse [g]
TS	Trockensubstanz [in % von der Frischmasse]
WFMD	Wurzel-Frischmassen-Dichte [mg cm ⁻³]
WLD	Wurzel-Längen-Dichte [mm cm ⁻³]
WTMD	Wurzel-Trockenmassen-Dichte [mg cm ⁻³]

1 Einleitung

Spargel (*Asparagus officinalis* L.) gehört zur Klasse der Monocotyledoneae, Familie der Asparagaceae (PASCHOLD & EIMERT (2007)). Nach MEUSEL et al. (1965) ist Spargel eine weit verbreitete euro-sibirische, kontinentale Pflanze. Mit einer Anbaufläche in Deutschland von ca. 21.800 ha im Jahr 2007 ist Spargel sowohl vom Anbauumfang als auch vom wirtschaftlichen Wert die in Deutschland wichtigste Gemüseart (KOCH 2007). Weltweit werden ca. 220.000 ha angebaut, wovon ca. 55 % als Grünspargel und ca. 45 % als Bleichspargel geerntet werden (BEHR 2005). In Deutschland werden ca. 95 % der Anbaufläche mit Bleichspargel bestellt.

Die Spargelpflanze besteht zum einen aus unterirdischen Pflanzenteilen, die in ihrer Gesamtheit als Krone bezeichnet werden und zum anderen aus den oberirdischen Pflanzenteilen, die als Triebe, Aufwuchs oder Kraut bezeichnet werden (Abbildung 1).

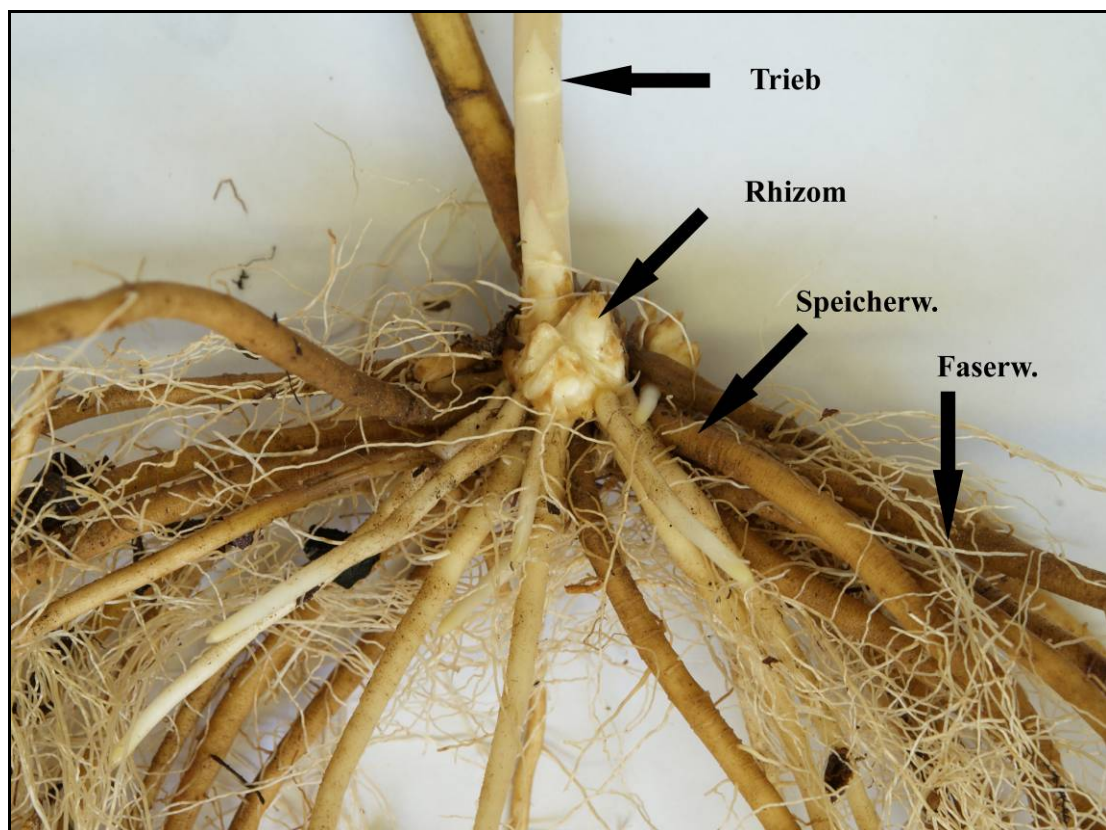


Abbildung 1: Junge Spargelpflanze mit neuen Speicherwurzeln (weiße Färbung), Faserwurzeln, jungen Rhizomteilen und einer ausgetriebenen Knospe.

Die Krone besteht aus 2-6 mm dicken fleischigen Speicherwurzeln, bis zwei mm im Durchmesser messenden Faserwurzeln und dem Rhizom. Das Rhizom setzt sich aus vielen einzelnen Knospen, die in mehrere Knospenbündeln, den Clustern, zusammengefasst sind, zusammen. Ein Cluster besitzt dabei eine dickere Knospe, die von vielen kleinen Knospen umgeben ist. Aus diesen Knospen entwickeln sich die Triebe. Aus den Clustern wachsen neben den Trieben auch die Speicherwurzeln. Die Speicherwurzeln können bis zu fünf Meter lang und bis zu sechs Jahre alt werden. Sie stellen das Hauptorgan der Speicherung von Reservestoffen dar und können in geringem Umfang Wasser und Nährstoffe aufnehmen. Aus dem Zentralzylinder der Speicherwurzeln wachsen die Faserwurzeln. Diese stellen die Wasser- und Nährstoffaufnahme der Pflanzen sicher (KRUG et al. 2002).

Die oberirdischen Pflanzenteile werden als Stange bezeichnet, wenn sie geerntet werden, oder als Triebe bzw. Kraut wenn sie durchtreiben können. An den Trieben zweiter oder dritter Ordnung befinden sich nadelförmig umgewandelte Kurztriebe, die Phyllokladien. Diese Phyllokladien sind die eigentlichen Assimilationsorgane.

Spargel hat unter den Gemüsearten einen Sonderstatus. Der Ertrag ist nicht nur von den im Anbaujahr, sondern auch von den im Vorjahr herrschenden Bedingungen abhängig. Die notwendigen Reservekohlenhydrate (RKH) werden im Aufwuchs gebildet, in die Speicherwurzeln verlagert und dort in die Speicherform umgewandelt. Diese Speicherstoffe sind wasserlöslicher Zucker, der überwiegend in Form von Fruktanen vorliegen. Fruktane sind in der Pflanzenwelt weit verbreitet. Bei den einkeimblättrigen Pflanzen kommen sie vor allem bei den Liliales, z. B. in Zwiebel, bei den Asparagales und auch bei den Poales vor. Bei den Gräsern werden sie vor allem im Frühjahr und Herbst bei niedrigen Temperaturen und hoher Sonneneinstrahlung produziert. Diese Energie kann nicht direkt in Wachstum umgewandelt werden, sondern wird in Form von Fruktanen gespeichert. Wenn dieses Gras mit hohen Konzentrationen an Fruktanen von Pferden gefressen wird, kann es eine Erkrankung des Hufes, die so genannte Hufrehe hervorrufen. In der menschlichen Ernährung sind Fruktane als Zuckerersatz für Diabetiker geeignet, da sie unverdaulich sind.

Spargel zählt zu den Wurzelsukkulenten mit Speicherorgan und gilt daher als trockenstresstolerant (WALTER 1979). Da der Anbau meist auf Standorten mit wenig speicherfähigen Sandböden erfolgt, kann ein wirtschaftlich optimierter Anbau häufig

nur mit Bewässerungsmaßnahmen erfolgen (HARTMANN 1981, PASCHOLD & MAYER 2006).

Steigende Anbauflächen mit zunehmenden Erntemengen und damit fallenden Erzeugerpreisen führen dazu, dass die Anbauer zunehmend unter wirtschaftlichen Druck geraten. Daher ist es das Ziel der Erzeuger die Kulturführung zu optimieren. Die Kulturführung lässt sich dann optimieren, wenn Anbauempfehlungen auf der Grundlage von objektiven Kriterien getroffen werden. Ein Instrument dazu stellt das Messen der Reservekohlenhydratgehalte in den Speicherwurzeln dar (PASCHOLD et al. 2002). Ein Problem dieser Methode ist allerdings, dass hierbei die Wurzelmasse, die einen ganz entscheidenden Einfluss auf die Gesamtmenge der gespeicherten RKH hat, vernachlässigt wird. Bislang liegen noch keine Untersuchungsergebnisse zum Wurzelwachstum, zur Wurzelverteilung und zum Einfluss der Bewässerung auf diese Parameter unter deutschen Anbaubedingungen vor. Daneben gibt es auch keine Ergebnisse zum Einfluss der Bewässerung auf den Reservekohlenhydrathaushalt bei Spargel.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist Erarbeitung von Lösungsansätzen, die es erlauben, die Quantifizierung des Einflusses einer differenzierten Bewässerung auf die unterirdischen Pflanzenteile des Spargels darzustellen. Hierbei soll vor allem das Wurzelwachstum unter mitteleuropäischen Anbaubedingungen betrachtet werden. Die Untersuchungen zum unterirdischen Wachstum von Pflanzen zeichnen sich vor allem durch einen hohen Einsatz an Arbeitszeit, bei gleichzeitig geringem Wissenszuwachs aus (BÖHM 1979). Neben der Beobachtung des Wurzel- und Rhizomwachstums bei differenzierter Bewässerung soll der Einfluss auf die Reservekohlenhydratkonzentration aufgeklärt werden. Auch die Kombination der Speicherwurzelmasse und des RKH-Gehaltes, die die Gesamtmenge an Reservestoffen und damit die Höhe des potentiellen Ertrages darstellt, soll aufgeklärt werden.

1.1 Kenntnisstand

1.1.1 Wachstumsdynamik

Spargel hat als mehrjährige Staude vier Pflanzenteile, die Speicherwurzeln, die Faserwurzeln, das Rhizom und die Triebe. Diese werden im Folgenden genauer beschrieben. Des Weiteren wird die Wachstumsrhythmik dargelegt.

1.1.1.1 Triebwachstum

Die oberirdischen Pflanzenteile werden als Triebe bezeichnet. Werden die Triebe nach der Ernte nicht mehr abgestochen, bilden sie Seitentriebe, aus denen wiederum büschelartig wachsende Kurztriebe, die Phyllokladien, hervorgehen. Diese Phyllokladien sind die eigentlichen Assimilationsorgane des Spargels. Da sich auf den Trieben erster Ordnung sehr wenige Stomata befinden (SCHALLER & PASCHOLD 2007), sind diese nur sehr eingeschränkt zur Photosynthese befähigt. Sie können jedoch nach DOWTON & TÖRÖFALVY (1975) das veratmete CO₂ wieder refixieren. Kurz vor dem Entfalten der Kurztriebe erreicht die Pflanze eine positive Photosyntheserate. Die Optimaltemperatur für die CO₂-Fixierung liegt nach SAWADA et al. (1962) zwischen 18 °C und 25 °C.

Das Triebwachstum erfolgt schubweise. In Mitteleuropa treiben die Sprosse je nach Witterung zwei- bis dreimal durch. Anhand dieser Rhythmik lässt sich eine apikale Dominanz erkennen (KRETSCHMER & HARTMANN 1979).

Während des Sommers produzieren die Phyllokladien Assimilate, die in die unterirdischen Speicherorgane verlagert werden. Unter deutschen Anbaubedingungen fangen die Triebe im Herbst an abzureifen. Die Abreifeinduktion erfolgt unter mitteleuropäischen Bedingungen über einen Temperaturreiz oder unter tropischen Bedingungen infolge von Wassermangel (KRUG 1996, 1998 1999a, 1999b). Während dieser Phase werden alle Reservestoffe aus den Trieben in die Speicherorgane verlagert, aber auch Nährstoffe, vor allem Stickstoff, werden zurückverlagert.

Nach der Winterruhe beginnen die Knospen neu auszutreiben. Das Triebwachstum von Spargel beginnt in größerem Umfang, wenn in Kronennähe die Schwellentemperatur von 12 °C überschritten wird (HARTMANN 1989, VOGEL 1996). Unterhalb dieser Schwellentemperatur sind das Stangenwachstum und die Triebbildung sehr stark

eingeschränkt. Nach KRUG (1996) kommt es auch schon bei Temperaturen zwischen 8 °C und 10 °C zu einer leichten Kronenaktivität. Bei Versuchen, die HARTMANN (1989) darstellte, konnte zum ersten Mal geerntet werden, nachdem drei Tage vor der Ernte und auch in den folgenden Tagen die Bodentemperatur in 20 cm Tiefe 12 °C überschritten hatte. Des Weiteren geht aus den Versuchen hervor, dass das Wachstum wieder eingestellt wird, sobald die Bodentemperatur 12 °C unterschreitet.

Aus Versuchen von DUFAULT (1996) geht hervor, dass 14 Tage vor dem ersten Sichtbarwerden von Grünspargel in 15 cm Bodentiefe durchschnittlich $13,4\text{ °C} \pm 2,7\text{ °C}$ geherrscht haben. Die hier beschriebenen Ergebnisse für Grünspargel können auch auf Bleichspargel übertragen werden.

BAUER (2000) gibt an, dass das Rhizom erst ab Temperaturen von 9 °C bzw. 10 °C aktiv wird. In weiteren Versuchen stellte er fest, dass das Stangenwachstum unterhalb von 16 °C stark eingeschränkt ist. Dies ist die höchste Schwellentemperatur, welche in der Literatur genannt wird.

Nach ROBB (1984) beginnt das Wachstum bereits ab 4,4 °C. Ob diese Werte in die Praxis übertragen werden können, kann jedoch bezweifelt werden, da diese Zahlen in anbetracht der anderen Untersuchungsergebnisse viel zu niedrig erscheinen.

Neben dem Temperatureinfluss auf die Austriebsgeschwindigkeit gibt es noch einen Effekt der Wintertemperaturen. Dieses Vernilisationsbedürfnis kann mit hohen Temperaturen bei beginnendem Triebwachstum gebrochen werden (YANGGUY et al. 2005).

1.1.1.2 Ertragsbildung

Das für den Anbauer wichtigste Kriterium beim Anbau von Spargel stellt der Ertrag dar. Beim Spargel entscheidet nicht nur die Ertragshöhe über den wirtschaftlichen Erfolg, sondern auch die Qualität hat einen entscheidenden Einfluss auf die Erlöse. Die höchsten Erlöse können in Deutschland mit der Qualitätsstufe 16-26 mm im Durchmesser erzielt werden. PASCHOLD et al. (2007) konnten einen Mehrertrag mit Bewässerung im Vergleich zur unbewässerten Kontrolle erzielen. Auch HARTMANN (1981) und PETERSON (2005) erzielten Mehrerträge mit Bewässerung. LAUN et al.

(2006) sowie SHELTON & LACY (1980) erzielten in den Varianten, die einen höheren RKH-Gehalt auswiesen, einen höheren Ertrag.

Die Knospenanzahl, die am Rhizom angelegt ist, limitiert nicht den Ertrag, da zu jedem Zeitpunkt genügend Knospen vorhanden sind, die austreiben können (WILSON et al. 1999a). DFAULT & WARD (2005) geben jedoch zu bedenken, dass die Stangen umso dünner werden, je länger die Erntesaison dauert. WILSON et al. (1999 a) berichten von einem stark reduzierten Ertrag, wenn eine Spargelanlage im Vorjahr zu lange beerntet wurde.

1.1.1.3 Speicherwurzelwachstum

Speicherwurzeln stellen eine Metamorphose der Wurzel dar. Als Besonderheit ist bei den Speicherwurzeln die Wurzelrinde sehr stark ausgeprägt. In diesem Wurzelgewebe werden die RKH und auch Mineralstoffe gespeichert. Die Speicherwurzeln wachsen aus dem Rhizom. Sie sind unverzweigt, können jedoch nach Beschädigung oder im folgenden Wachstumsjahr von der Wurzelspitze aus verzweigt weiterwachsen. Wenn die Speicherwurzeln in ihrer Exodermis noch kein Lignin und noch kein Suberin eingelagert haben, sind sie noch in der Lage, Wasser und Nährstoffe aus der Bodenmatrix aufzunehmen. Das Wurzelwachstum beginnt erst, wenn sich der erste Trieb voll entwickelt hat, und endet, wenn im Herbst die Abreife des Laubes einsetzt (DROST 1997). Laut HAYNES (1987) beginnt das Speicherwurzelwachstum jeweils Ende Juli bzw. Anfang August und dauert bis in den November hinein an.

Die Durchwurzelung des Bodens durch die Speicherwurzeln wurde von verschiedenen Autoren untersucht. SCOTT et al. (1929) (zitiert in DROST 1997) stellten fest, dass ca. 80 % der Speicherwurzelmasse in den oberen 30 cm des Bodenprofils vorhanden ist. In den oberen 90 cm befanden sich 95 % der Masse. Allerdings wurden auch in einer Bodentiefe von 2 m noch einige Speicherwurzeln gefunden. WEAVER & BRUNER (1927) geben an, dass die meisten Speicherwurzeln in den oberen 100 cm des Bodenhorizontes vorhanden sind, aber auch einzelne Speicherwurzeln bis in eine Tiefe von 3 m vordringen können. REIJMERINK (1973) sowie VAN DAM & HULSHOF (1973) untersuchten die Wurzelverteilung von Spargel auf verschiedenen Standorten in den Niederlanden. Sie stellten fest, dass ab einem Penetrometer-Messwert von 3 MPa das Wurzelwachstum von Spargel sehr eingeschränkt war. Aus diesen Untersuchungen geht

auch die Empfehlung hervor, dass bei einer Untersuchung mit dem Penetrometer festgestellte Verdichtungen, die einen Messwert über 3 MPa aufweisen mit einer Tiefenlockerung beseitigt werden sollten. Aussagen zur Verwendung der Lagerungsdichte als Messgröße liegen bislang nicht vor.

DROST & WILSON (2002 und 2003) untersuchten die Durchwurzelung auf zwei verschiedenen Standorten in Neuseeland. Sie stellten einen signifikanten Unterschied zwischen einem sandigen Lehmboden und einem schluffigen Lehmboden fest. Im schwereren Boden wuchsen die Speicherwurzeln nicht so tief, wiesen allerdings eine größere Wurzellänge und höhere Trockensubstanzgehalte auf als im leichteren Boden. Im Gegensatz dazu stellten WEINHEIMER & PASCHOLD (2007b) fest, dass unter deutschen Anbaubedingungen auf einem schwereren Boden die Pflanzen tiefer, aber nicht soweit zwischen die einzelnen Spargelreihen wurzeln. DROST & WILCOX-LEE (2000) wiesen einen Einfluss der Bodenbearbeitung auf das Wurzelwachstum nach. In den Parzellen ohne Bodenbearbeitung war die Durchwurzelung größer. Sie fanden die meisten Speicherwurzeln in einer Tiefe zwischen 30 cm und 45 cm.

Den Einfluss der Bewässerung auf das Speicherwurzelwachstum unter Feldbedingungen untersuchten bislang nur DROST (1999a) und PETERSON (2005). DROST (1999a) stellte fest, dass mit steigender Bewässerungsintensität die Speicherwurzelanzahl erhöht wurde. Die mittlere Durchwurzelungstiefe wurde aber nicht beeinflusst. PETERSON (2005) stellte bei einer Bewässerung mit Tropfbewässerung eine Zunahme der Durchwurzelung in tiefen Bodenschichten im Vergleich zu einer Bewässerung mit Kreisregnern fest. Auch die Speicherwurzel trockenmasse war erhöht. Im Vergleich verschiedener Bewässerungsstufen ergaben die Untersuchungen keinen Einfluss auf die Speicherwurzel frischmasse. Der Wissensstand über den Einfluss der Bewässerung auf das Speicherwurzelwachstum unter mitteleuropäischen Praxis-Anbaubedingungen ist bislang sehr lückenhaft, daher wurde in der vorliegenden Arbeit auf diesen Gesichtspunkt ein besonderer Schwerpunkt gelegt.

In Gefäßversuchen konnte von verschiedenen Autoren ein Einfluss der Bewässerung auf das Speicherwurzelwachstum ermittelt werden (BLOOM 2003, PASCHOLD & MAYER 2006, MAYER & PASCHOLD 2007, WILCOX-LEE & DROST 1990). Bislang wurde das Wurzelwachstum allerdings immer nur von einer Proberodung bis zur nächsten

ermittelt. Im Laufe einer Vegetationsperiode wurde der Zuwachs der Speicherwurzeln bislang nicht erfasst.

1.1.1.4 Rhizomwachstum

Das Rhizom ist eine unterirdisch horizontal wachsende Sprossachse mit sehr kurzen Internodien. Es besteht aus sehr vielen Knospen. Nach oben wachsen aus dem Rhizom die Triebe und nach unten werden die Speicherwurzeln gebildet. Die einzelnen Knospen sind zu Knospenbündeln, den Clustern zusammengefasst. Ein Cluster besteht aus sehr vielen kleinen und kleinsten Knospen und besitzt mindestens eine große (> 5 mm im Durchmesser) Knospe. Die alten Rhizomteile sterben nach einigen Jahren ab, sodass sich aus zunächst einer Pflanze mehrerer Pflanzen entwickeln können. Die Dicke der Knospen entscheiden über den zukünftigen Durchmesser der Stangen, da Spargel als Monocotyledoneae nicht zu sekundärem Dickenwachstum fähig ist. Dieser Knospendurchmesser kann durch Bewässerung vergrößert werden (DROST & WILCOX-LEE 1997b). Das Rhizomwachstum ist nur durch sehr aufwendige Untersuchungen zu bestimmen. Um das Rhizomwachstum festzustellen, müssen die Pflanzen immer aus dem Wachstumsmedium ausgewaschen werden. Zudem besteht das Rhizom aus sehr vielen einzelnen Knospen, die nur mit sehr großem Aufwand gezählt werden können. Daneben können sich unter Niederblättern bereits vorhandener Knospen weitere Triebanlagen befinden, die nicht zu erkennen sind. Dies alles macht es sehr schwierig den Einfluss verschiedener Faktoren auf das Wachstum einzelner Knospen mit einer ausreichenden Genauigkeit zu untersuchen. Daher wurde in dieser Arbeit der Einfluss der Bewässerung auf die Clusteranzahl als Maß für das Rhizomwachstum herangezogen.

1.1.1.5 Faserwurzelwachstum

Die Faserwurzeln des Spargels sind das Organ, das die Nährstoff- und Wasseraufnahme sicherstellt. Sie messen ca. 1-2 mm im Durchmesser (DROST 1997). Über die Lebensdauer dieser Wurzeln gibt es bislang keine Untersuchungen.

REIJMERINK (1973) sowie VAN DAM & HULSHOF (1973) untersuchten die Wurzelverteilung von Spargel auf verschiedenen Standorten in den Niederlanden. Sie stellten dabei eine sehr große Spannweite der Durchwurzelung fest. Auf Böden mit einem sehr hohen Penetrometer-Messwert fanden sie keine Wurzeln mehr unter den

Verdichtungshorizonten. Auch nach EHLERS (1996) hemmen hohe Lagerungsdichten das Wurzelwachstum. DROST & WILSON (2002 und 2003) untersuchten die Wurzelverteilung auf verschiedenen Standorten in Neuseeland. Auch sie fanden große Unterschiede im Faserwurzelwachstum zwischen den einzelnen Flächen. Sie stellten einen typischen Jahresgang fest. Zu Beginn der Ernte waren sehr viele Faserwurzeln vorhanden. Während der Erntephase ging die Faserwurzel-Längendichte zurück und stieg dann wieder bis zum Sommer an. Im Herbst ging die Faserwurzel-Wurzellängendichte wieder zurück.

Die Wurzeln reagieren sehr artspezifisch auf Bewässerung. Manche Arten verstärken ihr Tiefenwachstum bei Trockenheit während andere Arten ihr Tiefenwachstum verringern (HUTCHINGS & JOHN 2003). Nach DROST (1999a) bildet Spargel bei gesteigerter Bewässerung mehr Faserwurzeln aus, die Durchwurzelungstiefe steigt jedoch nicht. EHLERS (1996) beschreibt, dass mit zunehmender nutzbarer Wasserkapazität die Wurzellängendichte zunimmt und mit zunehmender Wurzellängendichte auch die Wasseraufnahmerate steigt. Auch WEINHEIMER & PASCHOLD (2007b) stellten auf einem Boden mit höherer Wasserkapazität höhere Faserwurzel-Längendichten fest.

1.1.2 Reservekohlenhydrathaushalt

Fruktane sind Speicherkohlenhydrate und kommen in der Natur in vielen Gemüsearten wie Chicoree, Tobinambur, Spargel (NELSON & SPOLLEN 1987, PONTIS 1990), Getreide (NILSSON et al. 1986, POLLOCK & CAIRNS 1991), und vielen Früchten (CAMPBELL et al. 1997) vor. Laut SUZUKI (1993) sind Fruktane auch zur Osmoregulation und Frostprotektion in den Zellen fähig. Fruktanhaltige Pflanzen gehören zu den Arten, die Kälte und Trockenheit gut überdauern können (PONTIS 1971).

Der Reservekohlenhydratgehalt in den Speicherwurzeln von Spargel ist hinreichend untersucht worden, vor allem der Jahresgang (SCOTT 1939, HAYNES 1987, MARTIN 1989, SHELTON & LACY 1980, WILSON et al. 1999a, SIOMOS & PONTIKIDOU 2000) und die Zusammensetzung der Reservestoffe. Diese Reservekohlenhydrate sind vor allem Zucker der Fruktangruppe. Je nach Untersuchungsort und Untersuchungszeitpunkt unterscheidet sich die Zusammensetzung dieser Zucker. SHIOMI (1993) berichtet von einem Polymerisierungsgrad (DP) bis zu 14 Zuckereinheiten. SHELTON & LACY (1980) berichten von Verhältnis Fruktose:Glukose von 9:1, was einem Polymerisierungsgrad

von bis zu 10 entspricht. SHIOMI et al. (1976) berichten hingegen von einem DP von bis zu 5. MARTIN (1989) konnte Stärke von bis zu 3 % feststellen. Diese Stärke lag aber nur kurzfristig vor. KIM & SAKIYAMA (1989) stellten Fruktose, Saccharose, Fruktane und sehr geringe Glukose-Gehalte fest. Der Polymerisierungsgrad der Fruktane lag dabei zwischen 3 und 13. Sie stellten keine Veränderung des RKH-Gehaltes im Rhizom im Laufe eines Jahres fest. Während der Ernte werden Fruktane mit einem hohen DP durch Hydrolyse in kürzere Formen, hauptsächlich Saccharose, Glukose und Fruktose, umgewandelt (WOOLLEY & WOOLLEY 2002).

CAIRNS (1992) konnte Unterschiede im RKH-Gehalt zwischen verschiedenen Sorten nachweisen. Die in der vorliegenden Arbeit verwendete Sorte Gijnlim wies mit den niedrigsten Gehalt auf.

Erstmalig wiesen TAGA et al. (1980) nach, dass der Zuckergehalt in den Speicherwurzeln eng mit dem Brix-Wert korreliert. Sie stellten den Zusammenhang zwischen dem Brix-Wert und den Zuckergehalt in der Frischmasse her. Auch WILSON et al. (2002) beschreiben den Brix-Wert als einfache Methode, um den RKH-Gehalt festzustellen. FELLER & FINK (2007) konnten ebenfalls unter deutschen Anbaubedingungen einen sehr guten Zusammenhang zwischen Brix-Wert und RKH-Gehalt feststellen. Diese beiden Autoren weisen aber auch auf die unterschiedliche Zusammensetzung der Zucker im Jahresverlauf hin, allerdings konnten sie an allen Terminen einen engen Zusammenhang zwischen Brix-Wert und RKH-Gehalt nachweisen.

PRESSMAN et al. (1989) und ERNST & KRUG (1998) stellten in Gefäßversuchen fest, dass Trockenperioden die Konzentration, den Polymerisierungsgrad und den Gesamtgehalt an RKH senken. Versuche unter Praxisbedingungen zum Einfluss einer Trockenheit auf den RKH-Gehalt der Speicherwurzeln liegen bislang nicht vor.

1.1.3 Ausgewählte Wurzelparameter

Zur Beschreibung der Durchwurzelung des Bodens wird die Wurzel-Längen-Dichte (WLD) als Maßeinheit verwendet. Sie dient in vielen landwirtschaftlichen Versuchen als Maß und wird in cm Wurzellänge je cm³ Boden angegeben (SMIT et al. 2000). Sie wird verwendet, um unterschiedliche Untersuchungen miteinander vergleichbar zu machen, da je nach Versuchsfrage und Untersuchungsstandort Bohrstöcke mit

unterschiedlichen Volumina verwendet werden. Nach CLAASSEN (1990) ist es aber aufgrund der hohen Streuung der Messwerte nicht möglich, mit vertretbarem Aufwand kleine Unterschiede in WLD festzustellen. Bei Spargel wurde diese Maßeinheit bislang von DROST & WILSON (2002 und 2003), DROST & WILCOX-LEE (2000) und von PETERSON (2005) zur Beschreibung der Durchwurzelung herangezogen.

Der mittlere Durchmesser der Speicherwurzeln wird mit ca. 5 mm angegeben (BLASBERG 1932, WEAVER & BRUNER 1927). Von diesen Autoren wird der Faserwurzelndurchmesser mit bis zu 2 mm angegeben. Untersuchungen zum Einfluss der Bewässerung auf den Wurzelndurchmesser bei Spargel liegen nicht vor.

Die spezifische Wurzellänge (SWL) wird in m Wurzellänge je g TM angegeben. Sie dient als Maß dafür, welchen Aufwand die Pflanze erbringen muss, um eine gewisse Wurzellänge aufzubauen. Je größer die SWL ist, desto weniger Energie muss die Pflanze zur Produktion einer Einheit Wurzellänge aufwenden. Die Spannbreite der bisher ermittelten SWL liegt zwischen 5 m gTM⁻¹ bei Apfel und 750 m gTM⁻¹ bei deutschem Weidelgras (ATKINSON 1990). Untersuchungen im Spargel zu dieser Fragestellung liegen bislang nicht vor.

Der mittlere-halbe-Wurzelabstand wird aus der WLD berechnet. Die Formel ist in Kapitel 2.9 dargestellt. Dieser Wert gibt an, welchen halben Abstand zwei Wurzeln voneinander haben. CALDWELL (1987) und YOUNG (1989) gehen davon aus, dass es ab einem mittleren-halben-Wurzelabstand (mhWa) zwischen 0,18 cm und 0,25 cm zur Konkurrenz um Nitrat, eventuell auch zur Konkurrenz um Kalium, jedoch nicht zur Konkurrenz um Phosphat kommen kann. MARSCHNER (1995) gibt die Erschöpfungszone für Nitrat mit einem Wurzelabstand von mehr als 0,1 cm bis 0,2 cm an. Damit kann es ab einem halben Wurzelabstand kleiner 0,25 cm zu einem Konkurrenzverhalten der Wurzeln um Nährstoffe kommen. Bei Spargel sind bislang keine Untersuchungsergebnisse zu diesem Parameter bekannt.

1.1.4 Wachstumsmodelle

Wachstumsmodelle zum Wachstum von Spargel liegen bislang nur zur Ertragsprognose (LIEBIG & WIEBE 1982, VELTEN et al. 2004, LAMPERT et al. 1980, HEIßNER et al. 2006) oder zum Beschreiben des Wachstums von Sämlingen unter tropischen Bedingungen (YEN et al. 1996) vor. Zum Einfluss der Bewässerung auf das Wachstum aller

Pflanzenteile von Spargel während der Vegetationsperiode liegen bislang keine Untersuchungen vor.

KRUG (1997) gibt eine Übersicht, welche mathematischen Modelle bzw. Formeln zur Beschreibung von Pflanzenwachstum geeignet sind. Anhand dieser wurden die Formeln zur Beschreibung des Spargelwachstums ausgewählt.

1.2 Zielsetzung und Aufgabenstellung

Bisherige Untersuchungen zum Einfluss einer Bewässerung auf das Wachstum von Spargel unter deutschen Anbaubedingungen beziehen sich lediglich auf die Ertragsunterschiede (PIEPENBROCK 2002, KUNZELMANN 1998, HARTMANN 1981), nicht aber auf den Einfluss auf die unterirdischen Organe des Spargels. Bislang gibt es lediglich Aussagen zum prinzipiellen Verlauf des RKH-Gehaltes von Spargel, nicht aber zum Einfluss der Bewässerung. Auch gibt es keine Aussagen zum zeitlichen Verlauf des Wachstums von Spargel im Jahresgang und hierbei im Besonderen des Wachstums der unterirdischen Pflanzenteile. BLOOM (2003) und ALDENHOFF (2004) stellen Ergebnisse zu Kronenmassen dar, die durch Proberodungen zum Versuchsende ermittelt wurden.

Daneben ist nur durch Untersuchungen von PETERSON (2005) und DROST (1999a) der Einfluss der Bewässerung auf die Wurzelverteilung im Bodenhorizont bekannt. Diese Untersuchungen wurden allerdings mit anderen als in Deutschland üblichen Spargelsorten durchgeführt, und die Standorte dieser Untersuchungen sind nicht vergleichbar mit den Bedingungen der in der Bundesrepublik vorkommenden Spargelanbaugebiete.

Ein weiteres Ziel dieser Arbeit war es, festzustellen, ob es möglich ist, mit einem Schnelltest Unterschiede im RKH-Gehalt in den Speicherwurzeln festzustellen. Daneben sollte auch überprüft werden, ob dieser Schnelltest dazu geeignet ist, die Ertragspotenz einer Spargelanlage abzuschätzen.

Anhand dieser Wissenslücken wurden folgende Arbeitshypothesen definiert:

1. Eine differenzierte Bewässerung hat einen Einfluss auf das Triebwachstum, sowohl auf die Gesamtrieblänge als auch auf den zeitlichen Verlauf des Wachstums.
2. Eine differenzierte Bewässerung hat einen Einfluss auf den Spargelertrag.

3. Eine differenzierte Bewässerung hat einen Einfluss auf das Speicher- und Faserwurzelwachstum, sowohl auf die Verteilung im Bodenprofil als auch auf den zeitlichen Verlauf des Wachstums.
4. Eine differenzierte Bewässerung hat einen Einfluss auf das Rhizomwachstum, sowohl auf die Rhizommasse als auch auf den zeitlichen Verlauf des Wachstums.
5. Eine differenzierte Bewässerung hat einen Einfluss auf den Reservekohlenhydrathaushalt, sowohl auf die Konzentration als auch auf die Gesamtmenge an Reservekohlenhydraten.

2 Material und Methoden

2.1 Versuchsprogramm

Aufgrund der Zielsetzung dieser Arbeit wurden Versuche durchgeführt, die sich in folgende Schwerpunkte einteilen ließen:

- Beobachtung des Wurzelwachstums im Jahresverlauf und der Einfluss einer differenzierten Bewässerung
- Wurzelverteilung im gewachsenen Boden und der Einfluss einer differenzierten Bewässerung
- Dynamik der RKH-Gehalte im Jahresverlauf und der Einfluss einer differenzierten Bewässerung

Zur Beobachtung des Wurzelwachstums im Jahresverlauf wurde ein Gefäßversuch angelegt. Die Basis dafür waren handelsübliche Euro-Gitterboxen. Der genaue Aufbau dieser Spezialgefäße wird in Kapitel 2.7 beschrieben. Die Wurzelverteilung im gewachsenen Boden wurde auf einer Praxisversuchsfläche in der Gemarkung Durmersheim, Landkreis Karlsruhe bestimmt. Die Versuchsfläche hat eine Größe von 5,5 ha, wovon 5,0 ha bewässert wurden und 0,5 ha unbewässert blieben. Die Fläche wurde von einem Anbauer praxisüblich bewirtschaftet. Die Auswahl dieser Fläche beruhte darauf, dass bewässerte und unbewässerte Teilflächen auf einem einheitlich bewirtschafteten Schlag vorhanden waren. Daneben wurde der Boden als typischer „Spargelboden“ klassifiziert. Dies war notwendig, um allgemein gültige Aussagen treffen zu können. Auch der Verlauf der RKH-Gehalte im Jahresverlauf wurde zum Einen auf dieser Praxisversuchsfläche und zum Anderen in Gefäßversuchen ermittelt. Hierzu wurden 120 L-Container verwendet. Der Vorteil dieser Container bestand in der Möglichkeit, durch Auswaschen die gesamte Pflanzenmasse erfassen zu können. Auch die Faserwurzeln, die beim Ausgraben unter Feldbedingungen verloren gehen können, lassen sich bei Gefäßversuchen erfassen. Nur dadurch wurde es möglich, die Gesamtmassebilanzen zu berechnen, die nötig sind, um eine Aussage zum Verlauf der RKH-Gehalte treffen zu können.

2.2 Allgemeine Informationen

2.2.1 Pflanzmaterial

Als Pflanzmaterial für Gefäßversuche wurden einjährige Spargelkronen der Sorte Gijnlim F1 (Limseeds B.V., Horst, Niederlande) verwendet. Die Sorte zeichnet sich durch ein sehr hohes Ertragspotenzial unter den Anbaubedingungen Deutschlands aus und gilt daher für den hiesigen Anbau als Standardsorte. Die Jungpflanzen aller Versuchsjahre stammten vom Jungpflanzenproduzenten Meinhardt, Weiterstadt. Die Parameter der verwendeten Pflanzen sind in Tabelle 1 dargestellt. Um Einflüsse durch unterschiedliche Jungpflanzenqualitäten auszuschließen, wurden für die einzelnen Versuche jeweils Jungpflanzen ausgewählt, die die gleiche Frischmasse und die gleiche Anzahl Knospenbündel aufwiesen. Besonders große als auch besonders kleine Pflanzen wurden nicht in die Versuche aufgenommen. Je Versuchsgefäß wurde eine Spargelpflanze 20 cm tief, gemessen ab der Oberkante des Gefäßes gepflanzt.

Tabelle 1: Merkmale der Spargeljungpflanzen für die Gefäßversuche (Mittelwerte \pm Standardabweichung).

Jahr	Pflanzenmasse [g]	Clusteranzahl [St.]	Wurzelszahl [St.]	Wurzellänge Ø [cm]
2005 (n=226)	62,5 \pm 7,9	3,2 \pm 2,0	23,3 \pm 4,1	26,2 \pm 3,0
2006 (n=142)	126,3 \pm 13,7	4,6 \pm 0,8	32,9 \pm 6,0	26,8 \pm 3,2
2007 (n=10)	85,5 \pm 5,1	3,3 \pm 0,8	26,2 \pm 4,1	23,5 \pm 4,1

2.2.2 Witterungsverlauf in Geisenheim der Jahre 2005 bis 2007

Der Niederschlag und die Lufttemperatur wurden auf den Freilandflächen des Fachgebietes Gemüsebau der Forschungsanstalt Geisenheim erfasst.

2005 lagen die Mitteltemperaturen der Luft während der Vegetationsperiode (April bis November) mit ca. 2 °K über dem langjährigen Mittel (Abbildung 2). Überdurchschnittlich hoch war die Niederschlagssumme im April. In diesem Monat wurde mit 75 mm die doppelte Menge im Vergleich zum langjährigen Mittel gemessen. Im Juni hingegen fiel nur ca. zwei Drittel der Niederschlagsmenge des langjährigen Mittels. Ab August folgte die Niederschlagsverteilung dem langjährigen Mittel.

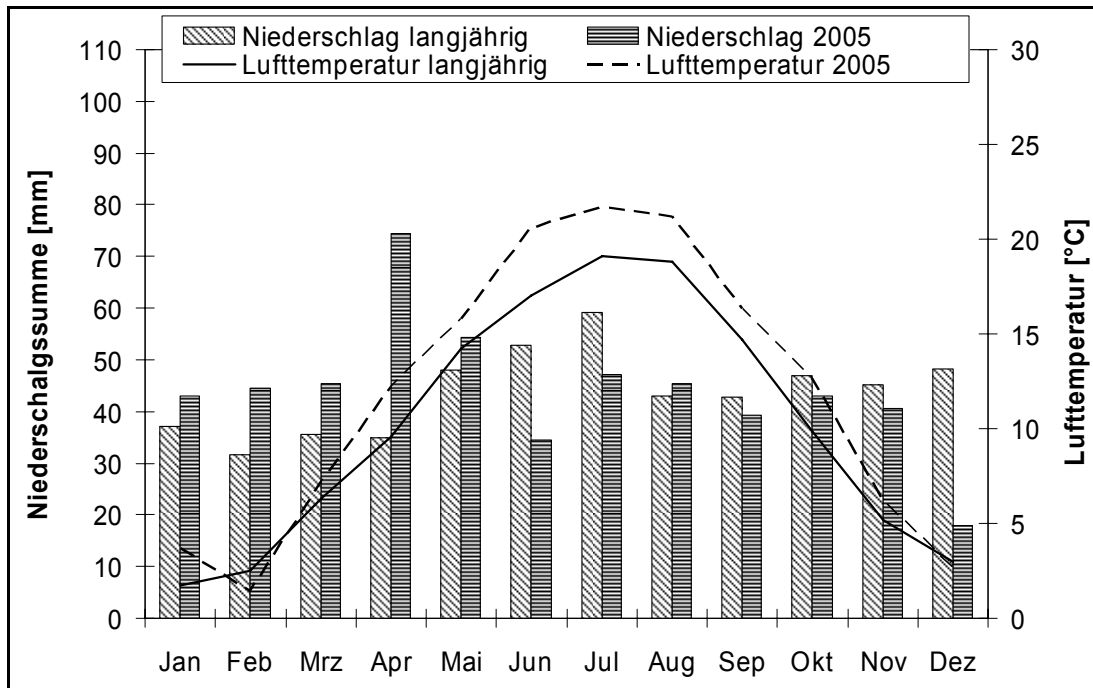


Abbildung 2: Monatsmitteltemperatur, Monatssumme der Niederschläge des Versuchsjahres 2005 und das langjährige Mittel (1971-2000). Quelle: DWD 2007

Im Jahr 2006 erwies sich die Witterung der Monate Juni, Juli und August als ungewöhnlich (Abbildung 3). Während im Juni und Juli die Temperaturen um bis zu 7 °K über dem langjährigen Mittel lagen, beliefen sich die Niederschlagssummen nur auf jeweils 20 mm. Das entspricht nur ca. 50% der erwarteten Niederschlagsmengen. In den anderen Monaten der Wachstumsperiode fielen zum Teil deutlich mehr Niederschläge als im Mittel. Vor allem im August, in dem die 2,5 fache Menge an Niederschlägen fiel.

2007 wurde im April, der der Pflanzmonat war, kein Niederschlag gemessen (Abbildung 4). Gleichzeitig lag die Monatsmitteltemperatur mit 15 °C um 5 °K über dem langjährigen Mittel. Im Juli fielen mit 79 mm Niederschlag ca. 20 mm mehr als im langjährigen Mittel. Im Oktober wurde dann mit 8 mm Niederschlag wiederum wesentlich weniger Niederschlag gemessen als im Mittel. Die Temperaturen bewegten sich im Bereich des langjährigen Mittels.

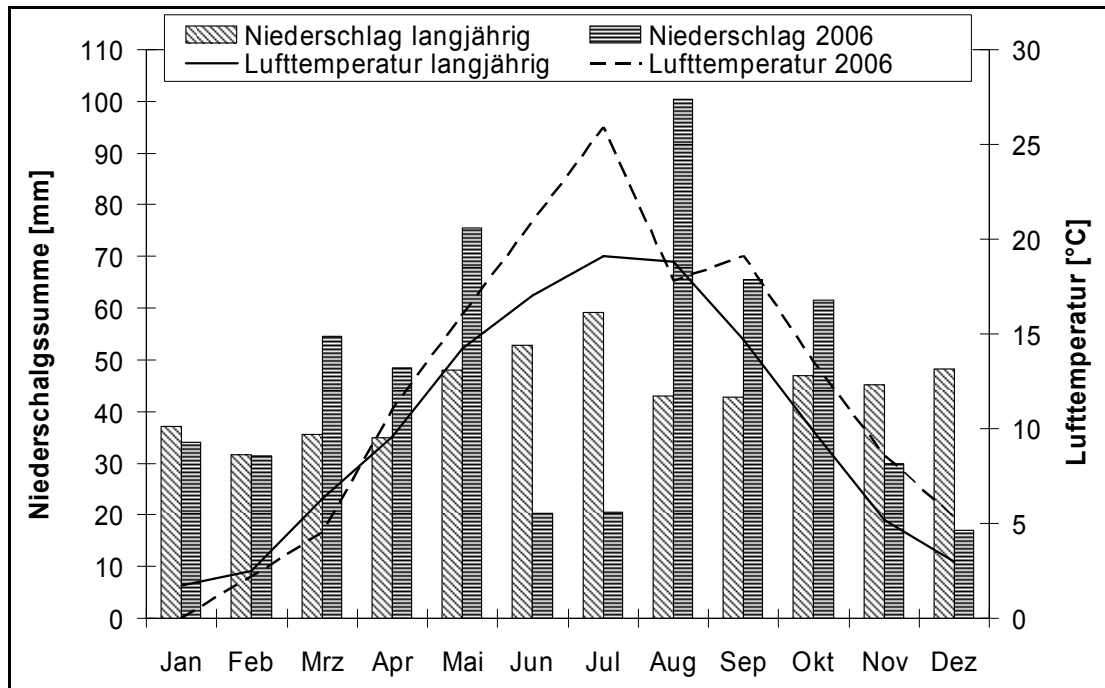


Abbildung 3: Monatsmitteltemperatur, Monatssumme der Niederschläge des Versuchsjahres 2006 und das langjährige Mittel (1971-2000). Quelle: DWD 2007

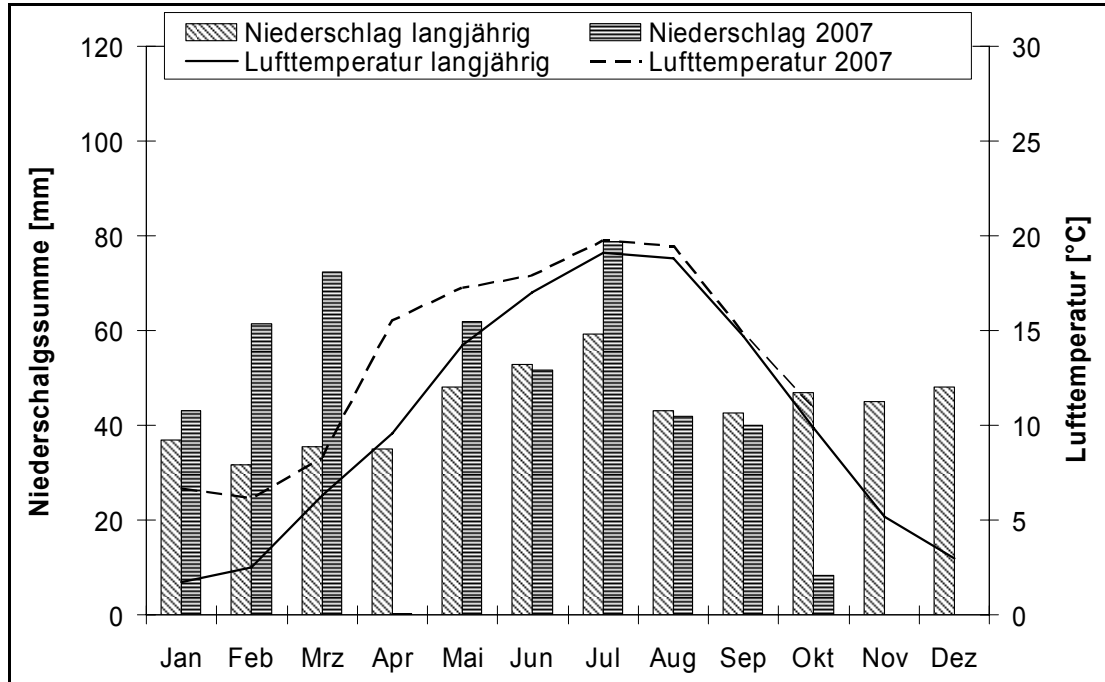


Abbildung 4: Monatsmitteltemperatur, Monatssumme der Niederschläge des Versuchsjahres 2007 und das langjährige Mittel (1971-2000). Quelle: DWD 2007

2.2.3 Witterungsverlauf der Praxisversuchsfläche

Die langjährigen Mitteltemperaturen des Standortes der Praxisversuchsfläche ähneln den Werten der Wetterstation Geisenheim. Lediglich in den Niederschlagsmengen unterscheiden sich die Stationen grundlegend (Anhang Abbildung 1 bis Anhang Abbildung 3). Für die Besonderheiten der Jahre 2005, 2006 und 2007 gelten die Aussagen über den Witterungsverlauf in Geisenheim.

2.2.4 Standortbeschreibung des Praxisversuchs

Der untersuchte Schlag befindet sich in der Gemarkung Durmersheim, Landkreis Rastatt, Baden-Württemberg. Die Jahresmitteltemperatur liegt bei 10,3 °C, der mittlere Jahresniederschlag beträgt 770 mm (DWD 2007). Es handelt sich um einen lehmigen Sandboden mit einer Bodenzahl von 34 Punkten. Der Oberboden (0-30 cm Tiefe) weist einen hohen Humusgehalt auf (Tabelle 2). Im Unterboden (> 30 cm Tiefe) steigt der Skelettanteil stark an. Unterhalb von 60 cm war eine Probenahme durch den hohen Steinanteil nur noch sehr eingeschränkt möglich.

Tabelle 2: Ergebnisse der chemischen Bodenuntersuchung des Praxisversuchs aus dem Jahr 2005.

Merkmal	Wert	Versorgungsstufe
pH-Wert [CaCl ₂]	6,7	
P ₂ O ₅ [mg/ 100 g]	25,0	D
K ₂ O [mg/ 100 g]	20,0	C
Mg [mg/ 100 g]	9,0	C
Humusgehalt [%] 0-30	1,9	
Humusgehalt [%] 30-60	0,8	
Humusgehalt [%] 60-90	0,2	

Die Anlage wurde Mitte April 2003 mit der Sorte Gijnlim bepflanzt. Die Pflanzdichte beträgt 15.200 Pflanzen je ha, bei einem Reihenabstand von 200 cm und einem Abstand in der Reihe von 33 cm. Die Kulturmaßnahmen der Jahre 2005-2006 können im Anhang (Anhang Tabelle 1 und Anhang Tabelle 2) eingesehen werden.

2.3 Bewässerung und Bewässerungssteuerung

- Praxisversuch

Ein Teil der Fläche wurde beim Pflanzen mit unterirdisch verlegten Tropfleitungen ausgestattet. Je Spargelreihe wurden zwei Leitungen mit einem Tropferabstand von 30 cm verlegt. Verwendet wurde der nicht druckkompensierende Tropfschlauch "T-Tape-TSX 515" (T-Systems Europe, S.A.S.). Es wurde jeweils ein Schlauch rechts und ein Schlauch links 10 cm unter und mit einem seitlichen Abstand von 20 cm zur Spargelkrone verlegt. Das Bewässerungswasser stammte aus einem Brunnen in der Nähe des Schlages.

Die Bewässerungssteuerung des Praxisversuchs lag in der Hand des Anbauers. Auf der bewässerten Teilfläche wurde mit einem Tensiometer die Bodenfeuchte gemessen. Die Keramikzelle des Tensiometers befand sich 20 cm unterhalb eines Tropfelementes der Tropfbewässerungsleitung. Die Daten wurden während der Bewässerungsperioden täglich aufgezeichnet. Eine Bewässerung erfolgte, wenn die Saugspannung - 200 hPa erreichte. Neben den Bewässerungsgaben wurden vom Anbauer auch die Niederschläge während der Bewässerungsperiode täglich erfasst.

- Gefäßversuche

Die Bewässerung der Gefäßversuche wurde automatisch über ein Tensiometer gesteuert. Tabelle 3 gibt die Einschaltpunkte der Bewässerung sowie die Wassermenge, die je Bewässerungsvorgang verabreicht wurde, an.

Die Gitterboxen wurden mit einem Tropfschlauch bewässert, der 5 cm unterhalb des Rhizoms eingebaut war. In jeder Box befanden sich vier Tropfelemente mit einer Wasserabgabe von je 2,3 L/h. Die Messung der Saugspannung erfolgte mit Tensiometern (Tensio-Technik, Geisenheim). Die Keramikzelle wurde jeweils ca. 5 cm unterhalb und 5 cm seitlich versetzt zu einem Tropfelement eingebaut. Der Verlauf der Bodenfeuchte wurde mit dem Steuergerät TensioControl (Fa. Knauer, Frankfurt/Main) und einem Messrechner und der Software Collect (Labtronics Inc.) aufgezeichnet. Im Vorversuch 2005 wurden alle Pflanzen einheitlich nach einer Kontrollpflanze bewässert. Diese Kontrollpflanze diente hierbei als Indikator für die Bewässerungssteuerung. Das bedeutet, wenn diese eine Spargelpflanze eine Bewässerung angefordert hat, bekamen

auch alle anderen Pflanzen dieses Versuchs dieselbe Wassermenge. In den Jahren 2006 und 2007 wurde die Bewässerung jeder Pflanze separat über eine eigene Bewässerungseinheit gesteuert.

Tabelle 3: Einschaltpunkte der Bewässerung [-hPa] und die ausgebrachte Wassermengen [L] je Gefäß und je Bewässerungsvorgang, der einzelnen Versuchsjahre und der Varianten.

Jahr	Versuch/Variante	Schaltpunkt	Wassermenge
2005	Container 120 L	200	10
	Gitterboxen Vorversuch	200	10
2006	Gitterboxen feucht	200	10
	Gitterboxen trocken	700	10
	Container 120 L	200	10
2007	Gitterboxen feucht	200	8
	Gitterboxen trocken	700	8

Der Containerversuch wurde mit zwei Einzeltropfern (Fa. Netafim PCJ 4 L/h) je Pflanze bewässert. Als Bewässerungssteuerung dienten Tensiometer des SensorMatik-Systems (Tensio-Technik, Geisenheim).

2.4 Temperaturmessung

- Bodentemperatur Gitterboxen

In den Gitterboxen wurde in je zwei Gefäßen jeder Variante in den Tiefen 20 cm und 40 cm unter der Bodenoberfläche die Temperatur gemessen. Die Temperatursensoren waren jeweils unter der Pflanze platziert. Die Daten wurden mit Dataloggern (Tinytag, Gemini Data Loggers (UK) Ltd.) aufgezeichnet.

- Bodentemperatur Containerversuche

In den Gefäßversuchen wurde die Bodentemperatur direkt unter der Krone gemessen und mit den genannten Dataloggern aufgezeichnet.

- Lufttemperatur

Die Lufttemperatur wurde durch die Wetterstation des Fachgebietes Gemüsebau erfasst. Die Werte wurden zweiminütig aufgezeichnet. Aus diesen Werten wurden Stundenmittel und daraus die Tagesmitteltemperatur berechnet.

2.5 Pflanzsubstrat

Als Pflanzsubstrat für alle Gefäßversuche wurde Sandboden aus Ingelheim/Rheinland-Pfalz verwendet. Um mögliche Wurzelreste oder Verunreinigungen zu entfernen, wurde der Sand vor der Verwendung gesiebt. Tabelle 4 gibt die Bodenmerkmale an, die kurz vor der Pflanzung ermittelt wurden. Der Boden in den Gefäßversuchen wurde so verdichtet, dass eine Lagerungsdichte von ca. $1,4 \text{ g cm}^{-3}$ erreicht war, da dies laut SCHEFFER (2002) der mittlere Wert der Lagerungsdichte für diese Bodenart darstellt.

Tabelle 4: Substratanalysen der einzelnen Versuchsjahre.

Merkmal	2005	2006	2007
Humusgehalt (CaCl_2) [%]	0,5	0,5	0,5
$\text{NO}_3\text{-N}$ (0-90 cm) [kg/ha]	14,0	40,0	11,0
P_2O_5 [mg/100 g]	18,0	6,0	11,0
K_2O [mg/100 g]	21,0	9,4	6,0
MgO [mg/100 g]	3,2	2,3	2,5
pH-Wert	7,0	7,1	7,6

2.6 Düngung

- Praxisversuch

Die Düngung des Praxisversuchs oblag der Verantwortung des Anbauers. Gedüngt wurde nach dem Ergebnis der Bodenuntersuchungen.

- Gefäßversuche

Die Düngung erfolgt mit dem vollwasserlöslichem Mehrnährstoffdünger Ferty 2-Mega (16+6+26(+3,4)) (Fa. Planta, Regenstauf). Jede Pflanze erhielt 6,5 g N. Dies entspricht einer Gesamtmenge von 90 kg N/ha bei 1,4 Pflanzen/m². Die Düngergabe wurde in 13

Einzelgaben aufgeteilt, die in der Vegetationsperiode ab Anfang Mai wöchentlich ausgebracht wurden. Hierzu wurde der Dünger zunächst in Wasser gelöst und dann die Düngelösung auf die Bodenoberfläche jedes Gefäßes ausgebracht. Ziel dieses Vorgehens war es, eine Fertigation, die im Praxisanbau mit Tröpfchenbewässerung als Standard durchgeführt wird, zu simulieren.

2.7 Beschreibung der Versuchsanlagen

- **Gefäßversuche**

- **Gitterboxen zur Beobachtung des Wurzelwachstums**

Zur Beobachtung des Wurzelwachstums von Spargel wurden spezielle Kulturgefäße gebaut. Als Grundgerüst dienten handelsübliche Euro-Gitterboxen mit den Maßen 120 x 80 x 80 cm. In diese Boxen wurde eine schräg stehende Plexiglasplatte in einem Winkel von 40° zur Horizontalen eingebaut. Auf diese Platten wurde ein Rahmen von 90 x 100 cm aufgezeichnet. Zur Bestimmung der Lage der Wurzeln wurde auf den Platten die Bodentiefe aufgetragen. Die einjährigen Spargelpflanzen wurden 20 cm unterhalb der Erdoberfläche eingepflanzt (Abbildung 5). Dabei wurde je Versuchsgefäß eine Pflanze verwendet. Die Bewässerung erfolgte wie in Kapitel 2.3 beschrieben. Das Abdecken mit einer handelsüblichen Silofolie verhinderte einen Lichteinfall auf die Plexiglasplatten. Zum Fotografieren wurde die Silofolie kurzzeitig entfernt. Die Gefäße standen im Freiland auf den Versuchsflächen des Fachgebietes Gemüsebau der Forschungsanstalt Geisenheim. Um ein Fotografieren der Plexiglasscheiben zu ermöglichen, wurden die Boxen in einer Höhe von ca. zwei Metern aufgestellt.

- **Containerversuch**

Bei mehrjährigen Gefäßversuchen wurden handelsübliche 120 L-Container verwendet. Zur Drainage wurde in die Tonnen vor dem Befüllen mit Pflanzsubstrat eine 10 cm hohe Kiesschicht eingebracht und eine Auslauföffnung installiert, damit Überschusswasser auslaufen konnte.

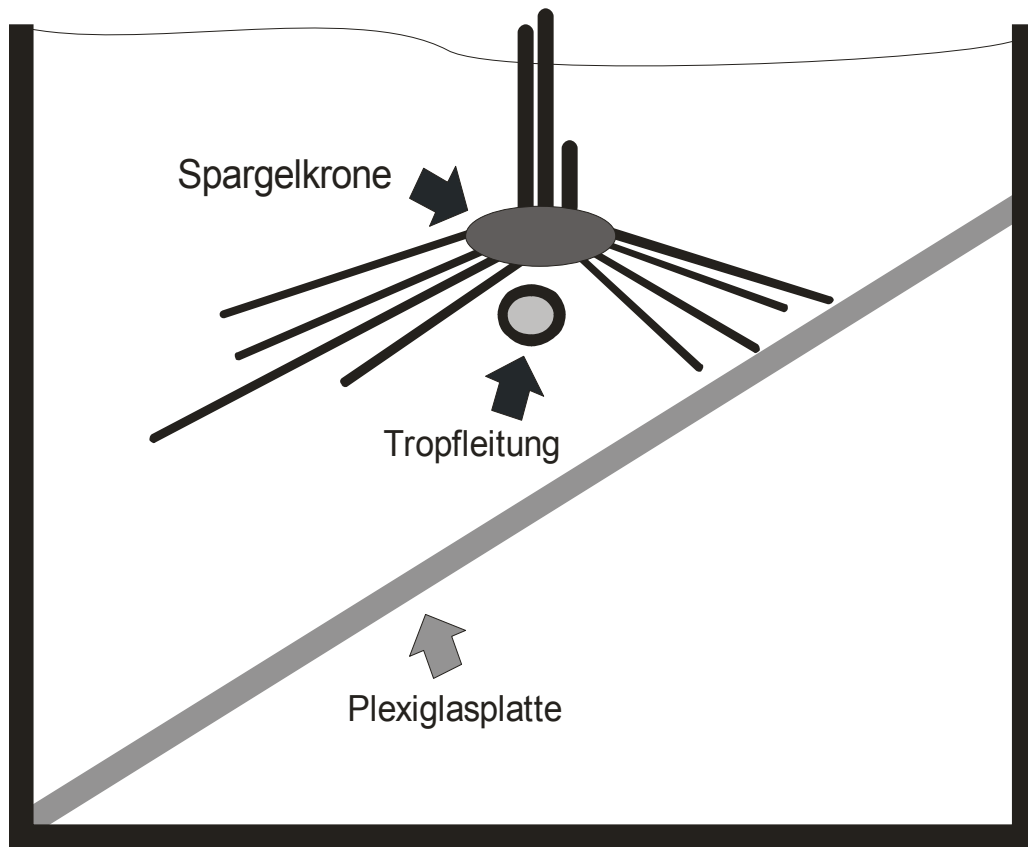


Abbildung 5: Aufbau der Gitterboxen zur Beobachtung des Wurzelwachstums im Querschnitt.

2.8 Bestimmung der Reservekohlenhydratgehalte

Zur Bestimmung der RKH-Gehalte wurde die Methode nach WILSON (2002) angewandt. Die Methode wurde jedoch an die Versuchsbedingungen angepasst.

- Probenahme
 - Gefäßversuche:

Zur Bestimmung der Reservekohlenhydratgehalte wurden fünf Wurzeleinzelproben aus jedem 120 L Container entnommen. Eine Einzelprobe bestand aus mindestens drei Wurzelstücken mit einer Gesamtlänge von mindestens 20 cm. Als geeignete Wurzeln dienten Speicherwurzeln mit einer mittelbraunen Färbung. Speicherwurzeln, die keine Faserwurzeln aufwiesen, wurden bei dunkelbrauner Färbung als zu alt, oder bei weißer Färbung als zu jung klassifiziert und daher verworfen.

- Praxisversuch

Bei der Beprobung des Praxisversuchs wurden je Variante 20 Einzelproben gezogen. Die Wurzeln wurden aus der Bodenschicht 20 - 30 cm Tiefe und in einem Abstand von 20 - 40 cm zur Reihenmitte aus zufällig gewählten Positionen im Feld entnommen. Die Auswahl geeigneter Speicherwurzeln erfolgte wie im in den Gefäßversuchen.

- Probenaufbereitung

Die Wurzeln wurden nach der Probennahme gekühlt transportiert. Anhaftende Erde wurde im Labor zuerst mit Trinkwasser, dann mit demineralisiertem Wasser abgewaschen. Um eine Gefriertrocknung zu vermeiden, wurde jede Einzelprobe in einen Plastikbeutel verpackt und jede Einzelprobe separat bei -18°C mindestens 24 Stunden eingefroren. Die Proben wurden nach spätestens zwei Wochen weiterverarbeitet, um mögliche Veränderungen in der Zuckerkonzentration bei zu langer Lagerdauer zu vermeiden. Hierzu wurden die Proben bei Raumtemperatur aufgetaut und in zwei cm lange Stücke geschnitten. Eine einheitliche Probenfeuchte wurde erreicht, indem die Wurzeln kurz mit einem Küchentuch abgetupft wurden. Die einheitliche Feuchte musste gewährleistet werden, um eine Verfälschung der Refraktometermessung durch unterschiedliche Wassergehalte zu vermeiden. Es musste aber auch darauf geachtet werden, dass die Wurzeln nicht zu lange aufgetaut blieben, um einen Wasserverlust durch Verdunstung zu vermeiden. Eine erhöhte Verdunstung hätte zu einer weiteren Konzentrierung der gelösten Stoffe geführt und so den Messwert verfälscht. Nach dem Auftauen wurden die Proben jeweils separat mit einer handelsüblichen Knoblauchpresse ausgepresst und der Presssaft in einem Messbecher aufgefangen. Da der Messwert zudem temperaturabhängig ist, wurde darauf geachtet, dass die Proben Umgebungstemperatur (15 - 20°C) angenommen hatten. Der Presssaft wurde dann auf ein Refraktometer aufgebracht und der Messwert in °Brix [°Bx] abgelesen.

2.9 Bestimmung der Wurzelmerkmale

- Gefäßversuche
 - Verlauf des Wurzelwachstums

Um das Wurzelwachstum entlang der Plexiglasplatte der Spezialgefäße bestimmen zu können, wurden im Turnus von ca. zwei Wochen Bilder von den Plexiglasplatten und den dort sichtbaren Wurzeln mit einer digitalen Fotokamera (Olympus E1) aufgenommen. Die Bilder wurden mit dem Bildbearbeitungsprogramm "Photoshop CS2" (Adobe Systems) soweit bearbeitet, dass sie mit dem Softwareprogramm "WinRHIZO™ 2001 A" (Regent Instruments Inc., Kanada) ausgewertet werden konnten. Dabei wurde die Gesamtlänge der Speicher- und der Faserwurzeln gemessen, die auf dem Raster der Plexiglasscheibe zu sehen war.

- Wurzelparameter bei Versuchende

Nach dem Auswaschen der Versuchspflanzen wurde die durchschnittliche Länge und Anzahl der Speicherwurzeln sowie die Frisch- und Trockenmasse von Rhizom, Speicher- und Faserwurzeln ermittelt. In den Speicherwurzeln wurde durch Messung des Brix-Wertes der Gehalt an wasserlöslichen Reservekohlenhydraten bestimmt.

- Praxisversuch
 - Probennahme und Aufbereitung der Wurzeln

Mit einem Bohrstock wurden Bodenzylinder entnommen. Die Zylinder hatten eine Höhe von 15 cm, Ende März, Mitte Mai und Ende Juni 2005 einen Durchmesser von 7,5 cm und Ende Juli, August und Oktober 2005 einen Durchmesser von 7 cm. Die Änderung des Durchmessers war durch einen Wechsel des Bohrstockes bedingt, der sich für die Beprobung als geeigneter erwies. Im Jahr 2006 hatten die Proben zu allen Terminen einen Durchmesser von 7 cm.

In den Abständen 15, 30, 60 und 90 cm zur Reihenmitte wurden jeweils Proben der Tiefen 0-15 cm, 15-30 cm, 30-45 cm und 45-60 cm entnommen (Abbildung 6). Dies entspricht einem Probenumfang von 16 Einzelproben je Entnahmestelle. Je Variante und je Termin wurden Proben in vier Wiederholungen -zufällig ausgewählt- von der Fläche entnommen. Dies entspricht einem Stichprobenumfang von 64 Einzelproben je Termin

und je Fläche. Die gewählte Entnahmetiefe von maximal 60 cm begründete sich aus Vorversuchen, in denen unterhalb von 60 cm keine Speicherwurzeln mehr gefunden wurden.

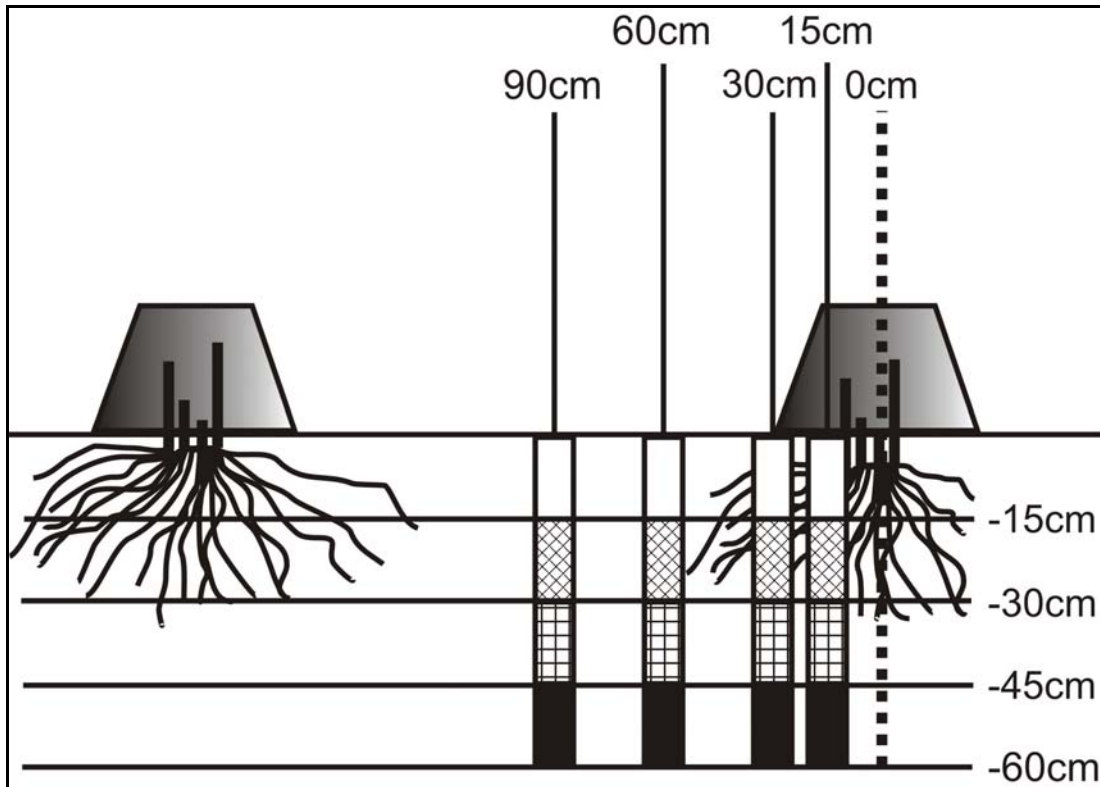


Abbildung 6: Entnahmeschema der mit einem Bohrstock entnommenen Wurzelproben.

Jede Einzelprobe wurde separat in einen Folienbeutel verpackt und bis zur weiteren Bearbeitung im Labor bei +2°C maximal zwei Tage gelagert. Um die Wurzeln von der anhaftenden Erde zu trennen, wurden die einzelnen Proben in einem Wasserbad über einem Sieb mit 1 mm Maschenweite ausgewaschen. Die Wurzeln wurden nach dem Waschen in Speicher- und Faserwurzeln getrennt und separat in PE-Beutel verpackt und wieder bei +2°C für maximal zwei Tage zwischengelagert. Zur Bestimmung der Wurzelparameter wurde jede Einzelprobe auf einen Scanner gelegt. Zur Erhöhung des Kontrastes des aufgenommenen Bildes wurden die Wurzeln mit einem schwarzen Papier abgedeckt. Die weitere Verarbeitung der Bilder erfolgte wie bei den Gefäßversuchen beschrieben. Die Frischmassen wurden direkt nach dem Scannen mit einer Analysenwaage bestimmt. Anschließend kamen die Einzelproben für mindestens

48 h bei 105°C in den Trockenschrank. Die Bestimmung der Trockenmasse erfolgte nach dem Abkühlen 24 h später.

Mit dem Programm "WinRHIZO™ 2001 A" wurden folgende Wurzelparameter bestimmt:

- Wurzellänge [cm]
- Mittlerer Wurzeldurchmesser [mm]

Aus der Wurzellänge jeder Einzelprobe und dem Volumen der Probe wurde die Wurzel-Längen-Dichte (WLD) in mm Wurzellänge je cm³ Boden berechnet.

Aus den Wurzelmassen und dem Volumen der Bodenprobe wurde die Wurzel-Massen-Dichte (mg Wurzeln je cm³ Boden) berechnet. So wurde die Wurzel-Frisch- und Wurzel-Trocken-Massen-Dichte (WFMD und WTMD) bestimmt.

Mit dem mittleren-halben-Wurzelabstand (mhWa) lassen sich Aussagen zur Nährstoffaufnahme ableiten. Nährstoffe nehmen die Wurzeln durch Massenfluss und Diffusion auf. Stickstoff besitzt dabei die höchste Mobilität im Boden. Kalium besitzt eine mittlere und Phosphor eine geringe Mobilität. Deshalb bilden sich bei Stickstoff größere und bei Phosphor kleinere Erschöpfungszonen um die Wurzeln. Ist die Wurzellängendichte (WLD) (cm / cm³) bekannt, so kann der mittlere-halbe-Wurzelabstand (mhWa) mit der Formel:

Formel 1: Abschätzen des mittleren-halben-Wurzelabstandes.

$$mhWa = \frac{1}{\sqrt{\pi * WLD}}$$

abgeschätzt werden (MARSCHNER 1995, YOUNG 1989, GILLESPIE 1989, CALDWELL & RICHARDS 1986). Wenn die Erschöpfungszone größer ist als der halbe Abstand zwischen den Wurzeln, kommt es zu einer Konkurrenz zwischen den Wurzeln um die Nährstoffe.

2.10 Erstellung der Verteilungsgraphiken

Die räumliche Verteilung von WLD und WMD wurde graphisch mit Excel dargestellt. Dazu wurden die berechneten Werte auf einzelne Punkte im Koordinatensystem bezogen. So wurde der berechnete Wert des Bodenzylinders 0-15 cm Tiefe und Abstand

15 cm auf den Punkt 7,5 cm Tiefe und 15 cm Abstand gelegt. Der Zylinder 15-30 cm Tiefe und 15 cm Abstand wurde auf den Punkt 22,5 cm Tiefe und 15 cm Abstand gelegt usw. Die Werte zwischen den Punkten ergaben sich aus einer linearen Interpolation.

2.11 Berechnung der Gesamtwurzellänge je Einzelpflanze

Die Gesamtwurzellänge je Einzelpflanze an den einzelnen Terminen, wurde mit Hilfe der ermittelten Wurzellängendichte berechnet. Hierzu wurde als durchwurzelter Raum je Einzelpflanze der Standraum 180 cm in der Breite, 60 cm in der Tiefe und 33 cm in der Länge angenommen. Mit diesem Bodenvolumen wurden die WLD sowohl der Speicher- als auch der Faserwurzeln multipliziert. Dies wurde für jede Variante, jeden Termin und jede Wiederholung durchgeführt. Als Ausgangs-WLD diente der Mittelwert, der aus den vier Abständen zur Pflanze und den vier Tiefen berechnet wurde.

2.12 Bestimmung der Wurzel- und Rhizommasse ganzer Pflanzen

Vor der Ernte und Ende Oktober wurden auf den Versuchsflächen ganze Pflanzen ausgegraben. Das erforderte ein Bodenvolumen von den Ausmaßen: Reihenabstand (je halber Reihenabstand nach rechts und nach links) x Pflanzenabstand in der Reihe x 2 x 0,6 m Tiefe auszuheben. Aus diesem Bodenvolumen wurden alle Speicherwurzel- und Rhizomteile ausgesiebt, gewaschen und die Frisch- und Trockenmasse bestimmt.

2.13 Ertragserfassung der Praxisversuchsfläche

Zur Ertragserfassung der Praxisversuchsfläche konnten keine Wiederholungen angelegt werden. Dies war aufgrund der arbeitswirtschaftlichen Vorgaben im Praxisbetrieb nicht möglich. In der bewässerten Variante diente eine Parzelle mit 953,6 m² und in der unbewässerten Variante eine Parzelle mit 347,8 m² zur Ertragserfassung. Der Unterschied in der Parzellengröße war aufgrund des Flächenzuschnittes der Versuchsfläche und der Abläufe bei der Ernte im Praxisbetrieb gegeben. Daher konnten die Flächen nicht gleichgroß gestaltet werden.

2.14 Bestimmung der Lagerungsdichte

Zur Bestimmung der Lagerungsdichte wurden 2006 und 2007 im Bestand Profilgruben bis in eine Tiefe von 75 cm gegraben. In das Bodenprofil wurden in einem Abstand von

60 cm zur Mitte der Spargelreihen Metallzylinder eingetrieben. Die Zylinder hatten ein Volumen von 100 cm³. In den vier Tiefen 15, 30, 45 und 60 cm wurden jeweils vier ungestörte Proben entnommen. Im Labor trockneten die Proben im Trockenschrank bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz. Aus dem Volumen und der Trockenmasse berechnet sich die Lagerungsdichte (g trockener Boden je cm³).

2.15 Bestimmung sonstiger Merkmale

- Kronenbonitur

Vor der Pflanzung wurden an den Kronen die Wurzelanzahl, die Clusteranzahl und die durchschnittliche Wurzellänge bestimmt. Zusätzlich wurden an den Kronen, die nicht gepflanzt wurden, sowohl die Frisch- als auch die Trockenmasse der Speicherwurzeln, der Faserwurzeln und des Rhizoms erfasst. Zur Pflanzung wurden je Versuch nur einjährige Pflanzen verwendet, die ein ähnliches Frischgewicht und eine ähnliche Clusteranzahl aufwiesen.

- Aufwuchsbonitur

Bei allen Gefäßversuchen wurde der Aufwuchs im Abstand von 5-7 Tagen vermessen und bonitiert. Es wurden der Durchmesser der Triebe an der Basis, die Einzeltrieblänge, der Entwicklungszustand der Phyllokladien und die Gesamttriebzahl ermittelt. Aus den Werten der Einzeltrieblänge wurde die Gesamttrieblänge aufsummiert.

Beim Praxisversuch wurde im Herbst (Anfang-Mitte Oktober) eine Bestandesbonitur durchgeführt. Dabei wurden je Variante 20 bestandestypische Pflanzen ausgewählt. Es wurden die Triebanzahl, die Anzahl der Triebe mit einem Durchmesser größer 10 mm an der Basis, die Länge des längsten Triebes, die mittlere Trieb länge, die Anzahl abgestorbener Triebe, die Anzahl der Triebe, die erst kurz vor der Bonitur ausgetrieben waren, und der Phyllokladienzustand erfasst. Im Herbst wurde bei den Gefäß- und bei den Freilandversuchen zusätzlich der Abreifeverlauf der Pflanzen erfasst. Hierzu wurde die Färbung des Laubes bonitiert und der Anteil von Trieben mit grünen, gelben, braunen und abgefallenen Phyllokladien ermittelt.

- Pflanzenschutz

Auflaufende Unkräuter wurden bei allen Gefäßversuchen von Hand entfernt. Je nach Bedarf wurden Fungizide und Insektizide eingesetzt. Im Praxisversuch oblag der Pflanzenschutz dem Anbauer.

2.16 Wachstumsverläufe in den Gitterboxen

Zur Beschreibung des Wachstums der Triebe diene das Merkmal Gesamtrieblänge. Bei der Beschreibung des Wachstums sowohl der Faser- als auch der Speicherwurzeln diene das Merkmal Wurzellänge an der Scheibe. Um das Wachstum der Triebe und der Wurzeln in Abhängigkeit von der Temperatursumme beschreiben zu können, diene bei den Wurzeln die Bodentemperatursumme, die in 20 cm Bodentiefe gemessen wurde. Hierbei wurden die Tagesmitteltemperaturen des Bodens, die größer 5 °C waren aufsummiert. Diese Temperaturgrenze beruhte auf Untersuchungen von KUTSCHERA (1960), die angibt, dass das Wurzelwachstum ab 5 °C beginnt. Beim Triebwachstum wurden die Tagesmitteltemperaturen der Luft aufsummiert, da das Triebwachstum von der Lufttemperatur abhängig ist. Eine Temperaturschwelle wurde nicht berücksichtigt, da in allen Versuchsjahren die Tagesmitteltemperatur während der Triebwachstumsphase über 6 °C lag. Als Modellgleichung diene Formel 2, die einen sigmoidalen Verlauf aufzeigt.

Formel 2: Gleichung zur Beschreibung der Wachstumsverläufe.

$$y = \frac{p_0}{1 + e^{\frac{x-p_1}{p_2}}}$$

Wobei y: Trieb- bzw. Wurzellänge [cm], p₀, p₁, p₂: Parameter (wobei p₀ die obere Grenze der Funktion, p₁ der Wendepunkt der Funktion und p₂ ein weiterer Parameter), x: Summe der Tagesmitteltemperatur des Bodens oder der Luft [°Cd].

Die Modellparameter werden jeweils separat angegeben. Die Parameter und die Güte der Anpassung der Funktion an die Messdaten wurden mit dem Statistikpaket R berechnet.

2.17 Berechnung des RKH-Gehaltes

Um den RKH-Gehalt in den Speicherwurzeln berechnen zu können, wurde Formel 3 von WILSON et al. (2005) verwendet. Sie lautet:

Formel 3: Berechnung des Reservekohlenhydratgehaltes in den Speicherwurzeln [mg gTM^{-1}].

$$RKH - \text{Gehalt} = 24,2 * \text{Brix} + 39,0$$

Wobei für Brix der Brix-Wert [$^{\circ}\text{Bx}$] einzusetzen ist. Mit Hilfe dieses RKH-Gehaltes wurde die Gesamtmenge an wasserlöslichen RKH (RKH_{ges}) berechnet. Dabei wird die Menge auf die Trockenmasse der Speicherwurzeln (TM_{SpW}) bezogen (Formel 4).

Formel 4: Berechnung der Reservekohlenhydratmenge je Pflanze [g/Pflanze].

$$RKH_{\text{ges}} = RKH - \text{Gehalt} * TM_{\text{SpW}}$$

2.18 Statistische Auswertung

Die Varianzanalyse erfolgt mit dem Programm R (R 2006). Die Grenzdifferenz (GD) wurde, wenn nicht anders vermerkt, mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha = 0,05$ mit dem Tukey-Test berechnet. Wenn keine Normalverteilung und/oder keine Varianzhomogenität vorlagen, wurde der Mann-Whitney-U-Test (zwei Stichproben) bzw. der Kruskal-Wallis-Test (mehr als zwei Stichproben) verwendet. Konnten mit dem Kruskal-Wallis-Test signifikante Unterschiede festgestellt werden, wurde als Post-Hoc-Test ein Nemenyi-Test durchgeführt, bei dem nach Ermittlung einer kritischen Summendifferenz durch einen Rangsummenvergleich Signifikanzen zwischen den einzelnen Varianten berechnet werden. Daher kann bei einem Nemenyi-Test keine Grenzdifferenz wie beim Tukey-Test (HSD) angegeben werden. Bei beiden Tests sind in den Tabellen signifikant unterschiedliche Gruppen mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet.

Die Berechnung der Korrelationkoeffizienten und der Bestimmtheitsmaße erfolgte bei einem linearen Zusammenhang mit Microsoft Excel. Bei nichtlinearen Anpassungen wurde R verwendet.

3 Ergebnisse

3.1 Verlauf der Bodenfeuchte im Praxisversuch

Während der Bewässerungsperiode des Jahres 2005 vom 10.06. bis 14.09. (Abbildung 7) fielen 176 mm Niederschlag. Bewässerungswasser wurde in einer Menge von 158 mm ausgebracht. Im selben Zeitraum des Jahres 2006 (Abbildung 8) fielen 183 mm Niederschlag. Es wurde in einer Menge von 156 mm bewässert. Das entspricht einer Gesamtwassermenge von 334 mm bzw. 339 mm. Die vergleichbare Gesamtwassermenge verteilte sich aber in beiden Jahren witterungsbedingt unterschiedlich. Während es im Jahr 2005 zu vereinzeltten Niederschlagsereignissen mit hohen Niederschlagsmengen kam, fielen im Sommer 2006 kleine Niederschlagsmengen, die auf viele kleine Niederschlagsereignisse verteilt waren. Auch die Bewässerungsgaben wurden in den beiden Jahren unterschiedlich verabreicht. Im Jahr 2005 wurde bis zum 14.09. bewässert, während 2006 die letzte Bewässerungsgabe am 08.08. verabreicht wurde. Im Verlauf der Bodenfeuchte wird dieser Unterschied sichtbar. Während 2005 die Bodensaugspannung durch die Bewässerungsmaßnahmen immer wieder über -300 hPa stieg, ging die Saugspannung bis zum 02.09.2006 auf unter -800 hPa zurück. Vom 17.07 bis zum 20.07.2006 ging die Saugspannung trotz täglicher Bewässerung in Höhe von 6 mm auf -600 hPa zurück. Erst durch eine erhöhte Bewässerungsgabe von 7,5 mm konnte die Saugspannung wieder auf über -300 hPa gesteigert werden. Anders verhielt sich die Niederschlagsverteilung im Jahr 2007 (Abbildung 9). Im Bewässerungszeitraum fielen 258 mm Niederschlag und es wurden lediglich 15 mm Zusatzwasser ausgebracht. Dennoch blieb die Bodensaugspannung bis zum 20.08. oberhalb von -300 hPa. Trotz eines weiteren Abfalls der Bodenfeuchte ab diesem Zeitpunkt wurde nicht mehr bewässert.

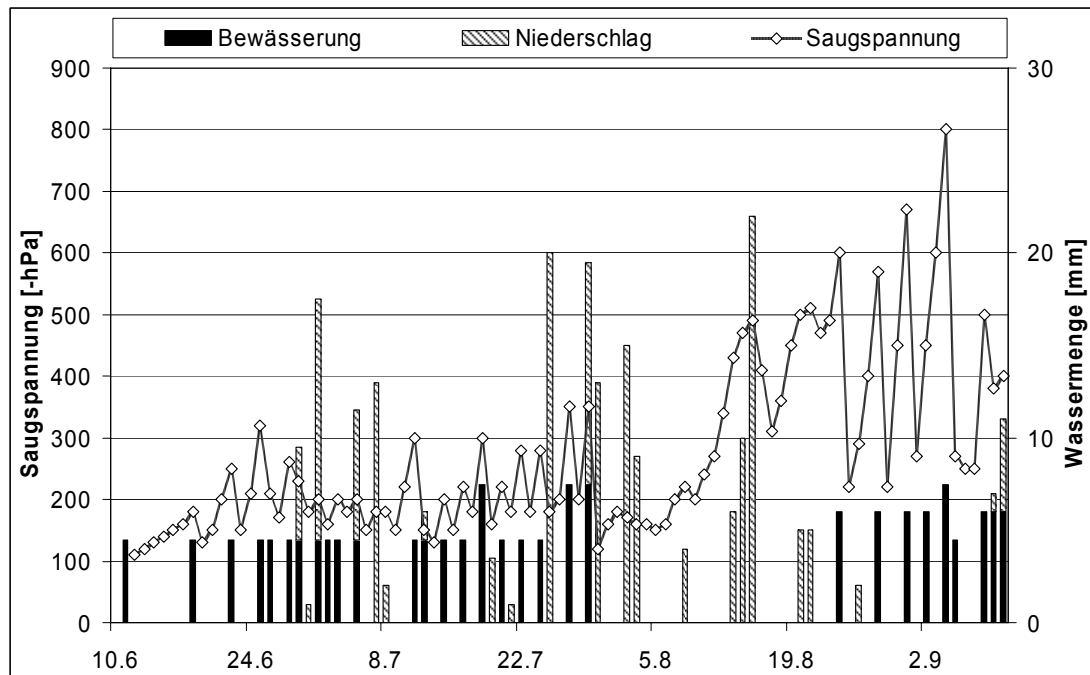


Abbildung 7: Verlauf der Bodensaugspannung [$-hPa$], der Bewässerungsmenge [mm] und der Niederschlagsmenge [mm] während der Bewässerungsperiode 2005 im Praxisversuch.

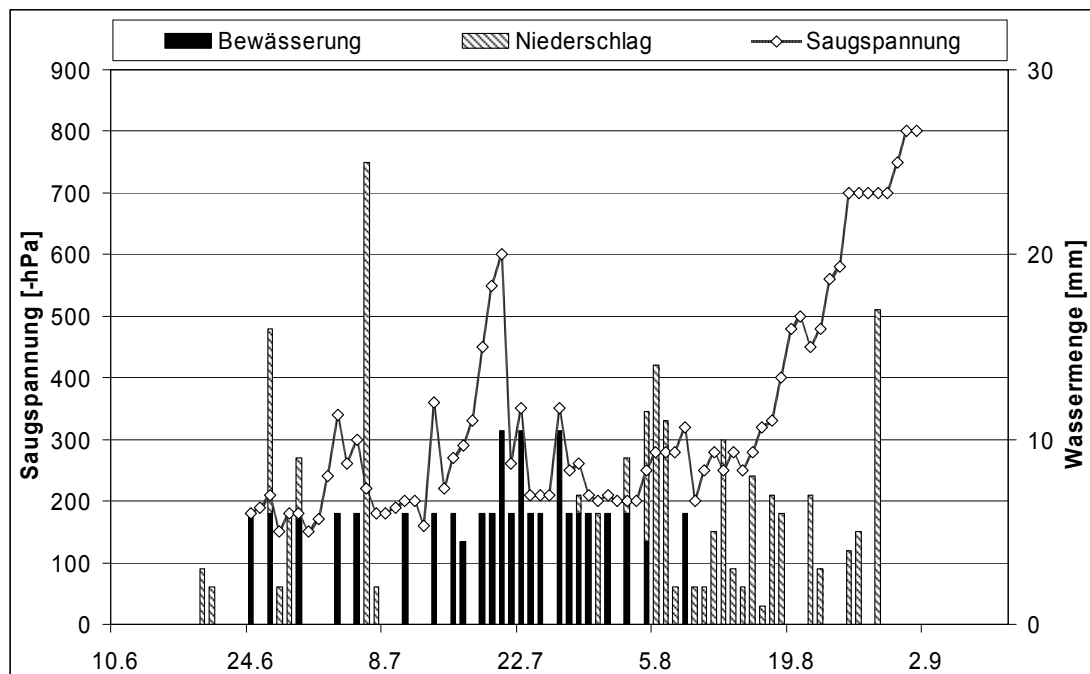


Abbildung 8: Verlauf der Bodensaugspannung [$-hPa$], der Bewässerungsmenge [mm] und der Niederschlagsmenge [mm] während der Bewässerungsperiode 2006 im Praxisversuch.

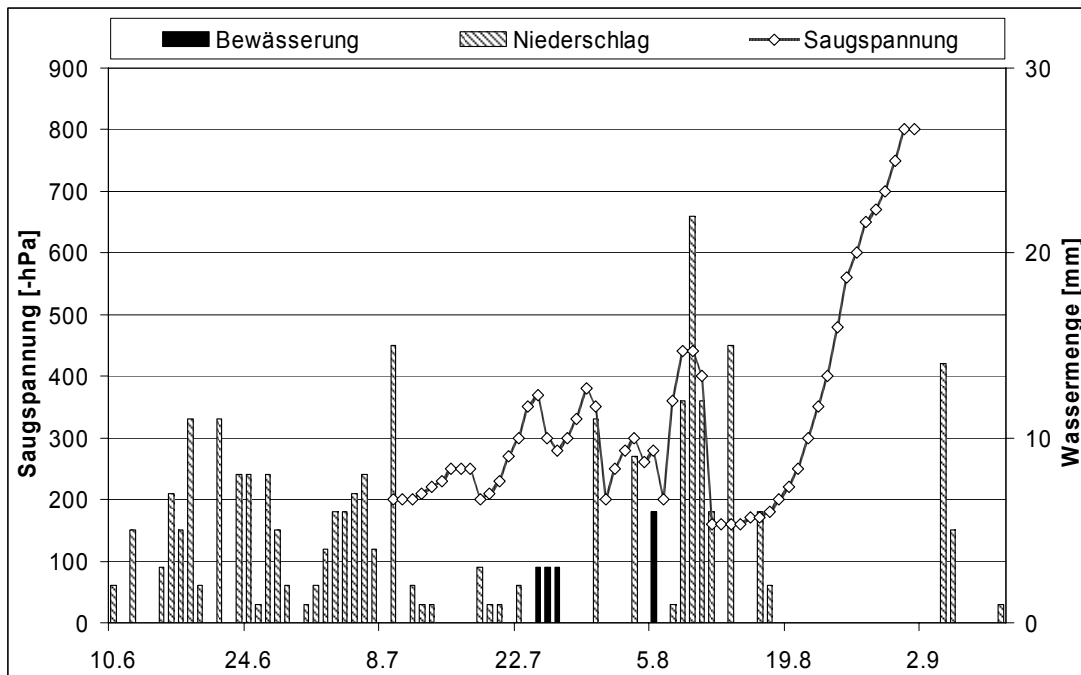


Abbildung 9: Verlauf der Bodensaugspannung [-hPa], der Bewässerungsmenge [mm] und der Niederschlagsmenge [mm] während der Bewässerungsperiode 2007 im Praxisversuch.

3.2 Einfluss des Wasserangebotes auf das Triebwachstum

3.2.1 Praxisfläche

3.2.1.1 Triebmerkmale

Die Bewässerung zeigte sowohl 2005 als auch 2006 als auch 2007 einen höchst signifikanten Einfluss auf die oberirdischen Pflanzenteile (Tabelle 5). In allen Untersuchungsjahren wies die bewässerte Variante mit 18,4 bzw. 25,2 bzw. 26,7 signifikant mehr Triebe je Pflanze zum Zeitpunkt der Herbstbonitur auf, als die unbewässerte. Ebenfalls erhöht war die Anzahl abgestorbener und neuer Triebe. Bei der Anzahl der Triebe mit einem Durchmesser an der Basis größer 10 mm haben die Pflanzen der bewässerten Variante mit 12,4 bzw. 14,5 bzw. 18,0 signifikant mehr Triebe dieser Durchmesserklasse. Allerdings ist der Anteil der dicken Triebe an der gesamten Triebanzahl bei den unbewässerten Pflanzen signifikant höher. Bei den Merkmalen „längster Trieb“ und „mittlere Trieblänge“ konnten keine Unterschiede ermittelt werden. Vergleicht man die drei Untersuchungsjahre innerhalb der gleichen Variante miteinander, so fällt auf, dass im Jahr 2007 in beiden Varianten sowohl die höchste

Triebanzahl, die größte Länge des längsten Triebes, die größte mittlere Trieb länge und die höchste Anzahl neuer und abgestorbener Triebe aufwies.

Tabelle 5: Ergebnisse der Herbstbonituren der Praxisversuchsfläche (n=20 je Variante, Mittelwert je Pflanze).

Merkmal	Variante	2005	2006	2007	HSD (5%)
Triebanzahl [St.]	bewässert	18,4 b	25,2 a	26,7 a	2,7
	unbewässert	9,1 b ***	11,2 a ***	12,6 a ***	2,0
Längster Trieb [cm]	bewässert	209 b	199 c	218 a	8,3
	unbewässert	205 b n.s.	196 c n.s.	222 a n.s.	6,1
Mittlere Trieb länge [cm]	bewässert	190 b	183 c	197 a	5,4
	unbewässert	191 b n.s.	180 c n.s.	200 a n.s.	6,4
Abgestorbene Triebe [St.]	bewässert	2,4 b	2,4 b	8,5 a	1,1
	unbewässert	0,7 b ***	1,4 b ***	5,0 a ***	0,9
Neue Triebe [St.]	bewässert	2,0 b	2,0 b	5,8 a	0,9
	unbewässert	1,4 ~	1,1 **	1,0 ***	n.s.
Triebanzahl Durchmesser > 10mm [St.]	bewässert	12,4 b	14,5 b	18,0 a	2,3
	unbewässert	8,0 c ***	9,9 a ***	11,0 a ***	1,7
Anteil Triebe Durchmesser > 10mm [%]	bewässert	68 a	59 b	68 a	8,4
	unbewässert	88 ***	90 ***	89 ***	n.s.

Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben innerhalb der gleichen Zeile unterscheiden sich signifikant nach Tukey-Test ($p \leq 0,05$). Signifikante Unterschiede innerhalb der gleichen Spalte berechnet mit F-Test (n.s.: nicht signifikant, ~: $p \leq 0,1$, *: $p \leq 0,05$, **: $p \leq 0,01$, ***: $p \leq 0,001$).

3.2.1.2 Verlauf der Abreife des Aufwuchses

Bei der Bonitur der Phyllokladien auf die Färbung wird in beiden Jahren deutlich, dass die Abreife des Laubes im Herbst bei den bewässerten Pflanzen vor der Abreife der unbewässerten Pflanzen begann. So blieben die Phyllokladien der unbewässerten Variante bis Ende September 2005 komplett grün, d.h. es war noch keine Abreife zu erkennen, während die bewässerten Pflanzen eine deutliche Gelbfärbung bzw. bereits abgefallene Phyllokladien aufwiesen (Abbildung 10 und Abbildung 11).

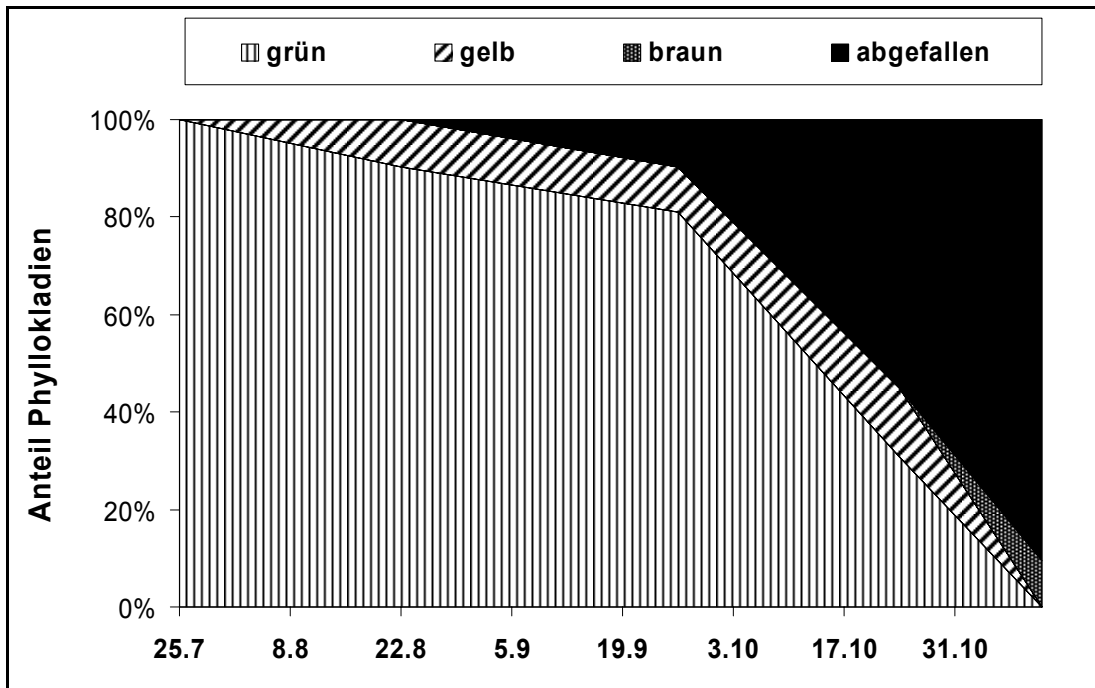


Abbildung 10: Anteile der Phyllokladien mit unterschiedlicher Färbung der bewässerten Pflanzen im Praxisversuch 2005.

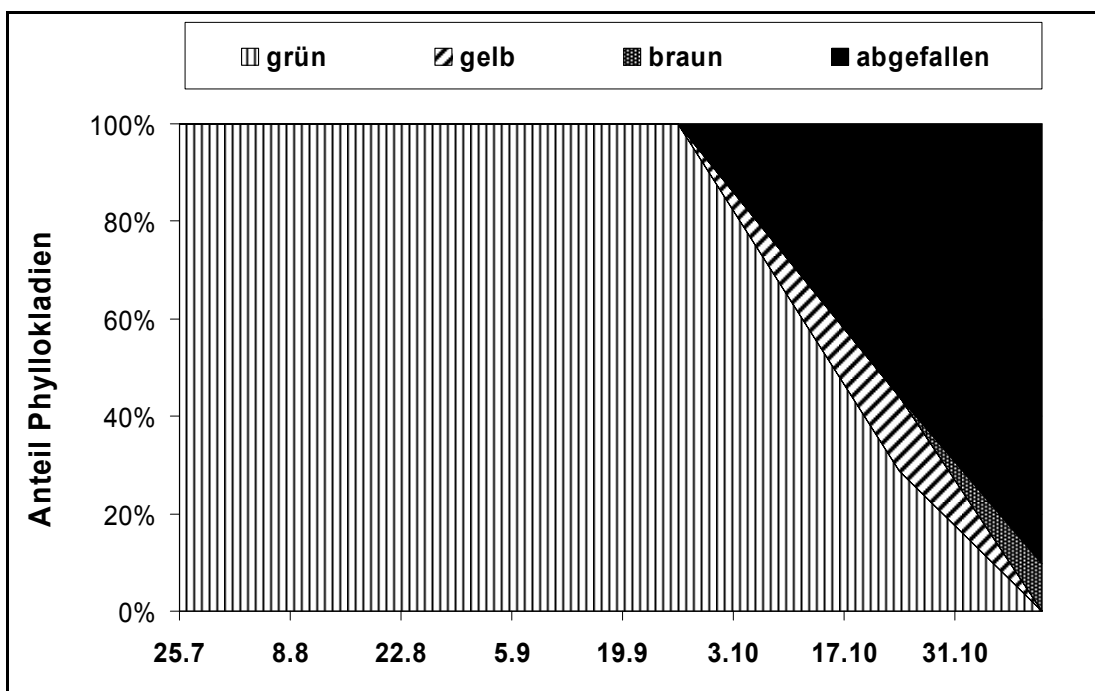


Abbildung 11: Anteile der Phyllokladien mit unterschiedlicher Färbung der unbewässerten Pflanzen im Praxisversuch 2005.

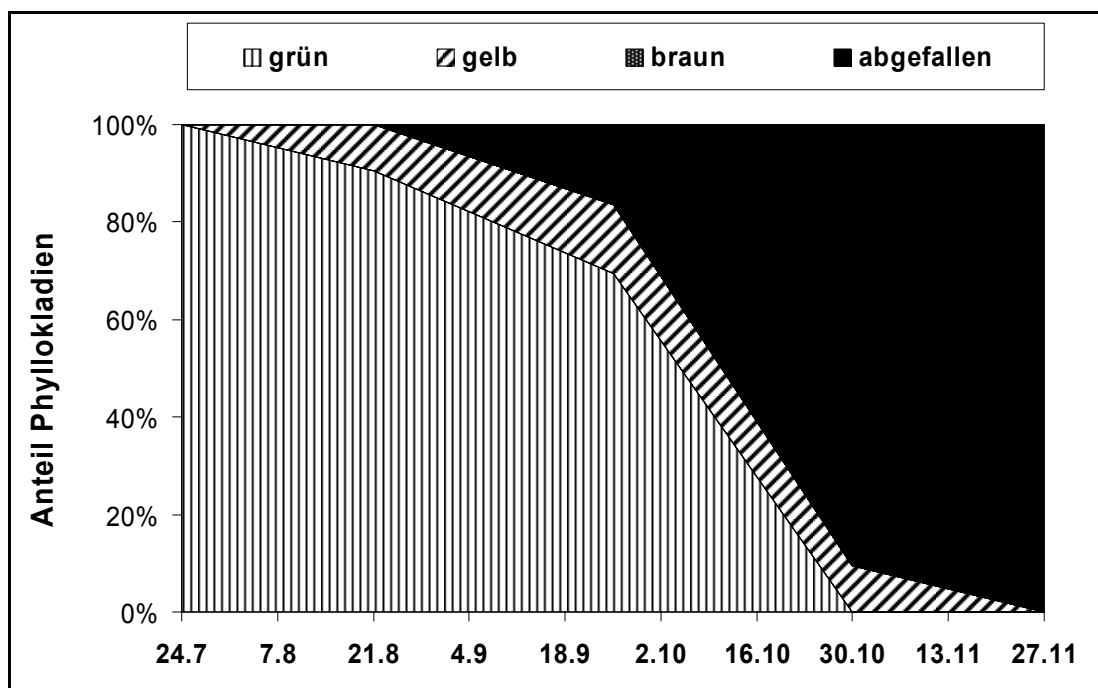


Abbildung 12: Anteile der Phyllokladien mit unterschiedlicher Färbung der bewässerten Pflanzen im Praxisversuch 2006.

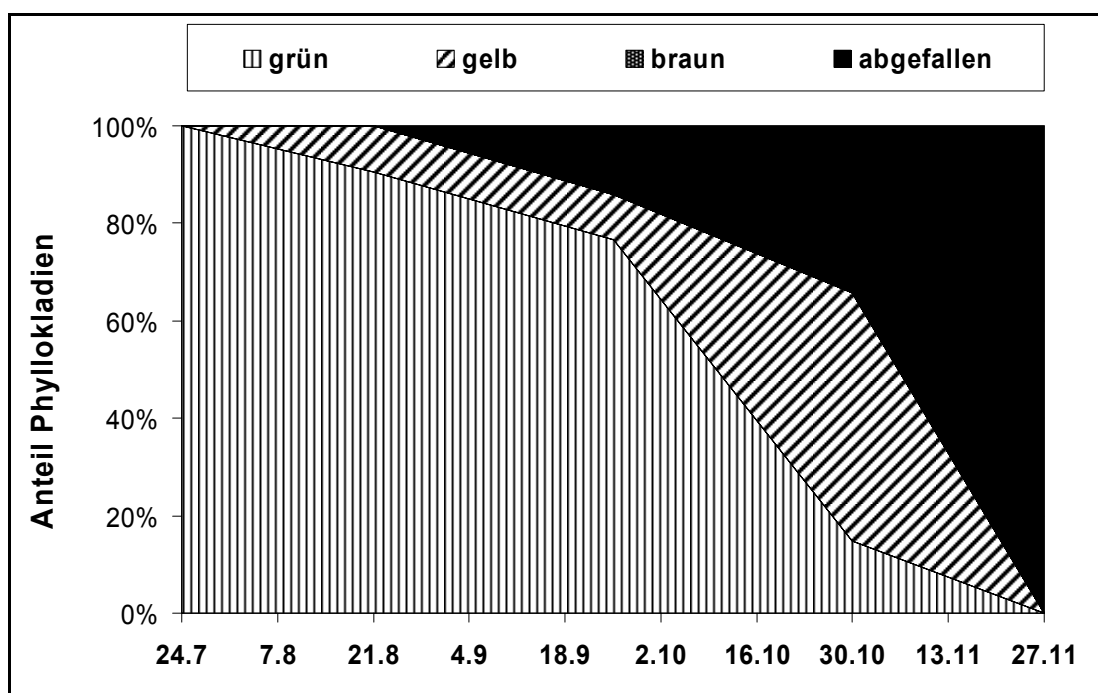


Abbildung 13: Anteile der Phyllokladien mit unterschiedlicher Färbung der unbewässerten Pflanzen im Praxisversuch 2006.

Im Jahr 2006 wiesen die Pflanzen der bewässerte Variante Ende Oktober bereits 90 % abgefallene Phyllokladien auf, während bei den unbewässerten Pflanzen erst 25 % abgefallen waren. Die bewässerten Pflanzen wiesen zu diesem Zeitpunkt keine grünen Pflanzenteile mehr auf, während die unbewässerten noch 15 % grüne und damit assimilationsfähige Phyllokladien besaßen (Abbildung 12 und Abbildung 13). Im Jahr 2007 konnten keine Unterschiede im Abreifeverhalten festgestellt werden.

3.2.2 Gitterboxen

3.2.2.1 Triebmerkmale

Tabelle 6 zeigt die Triebmerkmale der Gitterboxen. Die Pflanzen der feuchten Variante bildeten signifikant mehr Triebe und eine signifikant größere Gesamtrieblänge. Der mittlere Triebdurchmesser wies im Jahr 2006 bei den Pflanzen der feuchten Variante dickere Triebe und im Jahr 2007 dünnere Triebe im Vergleich zu den Pflanzen der trockenen Variante auf. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Triebbonituren des Praxisversuches (vgl. Tabelle 5). Die feucht kultivierten Pflanzen bilden mehr Triebe, aber prozentual weniger dicke Triebe. Somit geht der mittlere Triebdurchmesser zurück. Die Gesamtwassermenge, die den Pflanzen zur Verfügung stand, unterschied sich deutlich. Die maximale Trieblänge unterschied sich nicht zwischen den beiden Varianten. Die trocken kultivierten Pflanzen erhielten 2006 15 % weniger und 2007 13 % weniger Wasser als die feucht kultivierten.

Tabelle 6: Wassermenge [L/Pflanze], Gesamtrieblänge [cm/Pflanze], mittlerer Triebdurchmesser [mm], Triebanzahl [St./Pflanze] und maximale Trieblänge [cm] der Gitterboxversuche (n=3 je Variante).

Jahr	Variante	Wasser- menge	Ges. Trieblänge	Trieb- durch- messer	Trieb- anzahl	Max. Trieblänge
2005	feucht	453	2143	--	24,3	140
2006	feucht	484	1500	10,2	17,3	153
	trocken	422	1417	9,2	14,7	150
2007	feucht	368	2086	7,8	20,3	148
	trocken	321	1283	10,0	14,5	152
Sig. F-Test		*	**	n.s.	***	n.s.

Signifikante Unterschiede berechnet für Hauptfaktor „Bewässerung“ F-Test (n.s.: nicht signifikant, *: $p \leq 0,05$, **: $p \leq 0,01$, ***: $p \leq 0,001$).

3.2.2.2 Verlauf der Abreife des Aufwuchses

Bei der Bonitur der Färbung der Phyllokladien beim Gitterboxversuch im Jahr 2006 ist klar zu erkennen, dass die Pflanzen der trockenen Variante länger einen Anteil an grünen Trieben besaßen als die Pflanzen der feuchten Variante (Abbildung 14 und Abbildung 15). So hatten die Pflanzen der feuchten Variante am 11.11.2006 nur noch 20 % grüne Blattfläche, während die trockener kultivierten Pflanzen noch 40 % an Phyllokladien mit einer Grünfärbung zeigten. Am 30.11.2006 wiesen die feuchten Pflanzen keine grünen oder gelben Pflanzenteile mehr auf. Bei den trockenen Pflanzen jedoch waren noch 30 % der Blattfläche mit gelben Phyllokladien behaftet. Die Unterschiede im Abreifeverlauf lassen sich nicht auf phytosanitäre Unterschiede zurückführen, da an den Pflanzen keine pilzlichen oder tierischen Schaderreger gefunden wurden. Die während der Vegetationsperiode trocken kultivierten Pflanzen könnten sich an Trockenheit adaptiert haben und so die im September/Oktober 2006 auftretende Trockenheit besser überdauert haben als die feucht kultivierten Pflanzen, die keine Möglichkeit hatten sich an trockenere Bedingungen anzupassen. Im Jahr 2007 wurde kein Unterschied im Abreifeverlauf zwischen den beiden Varianten festgestellt.

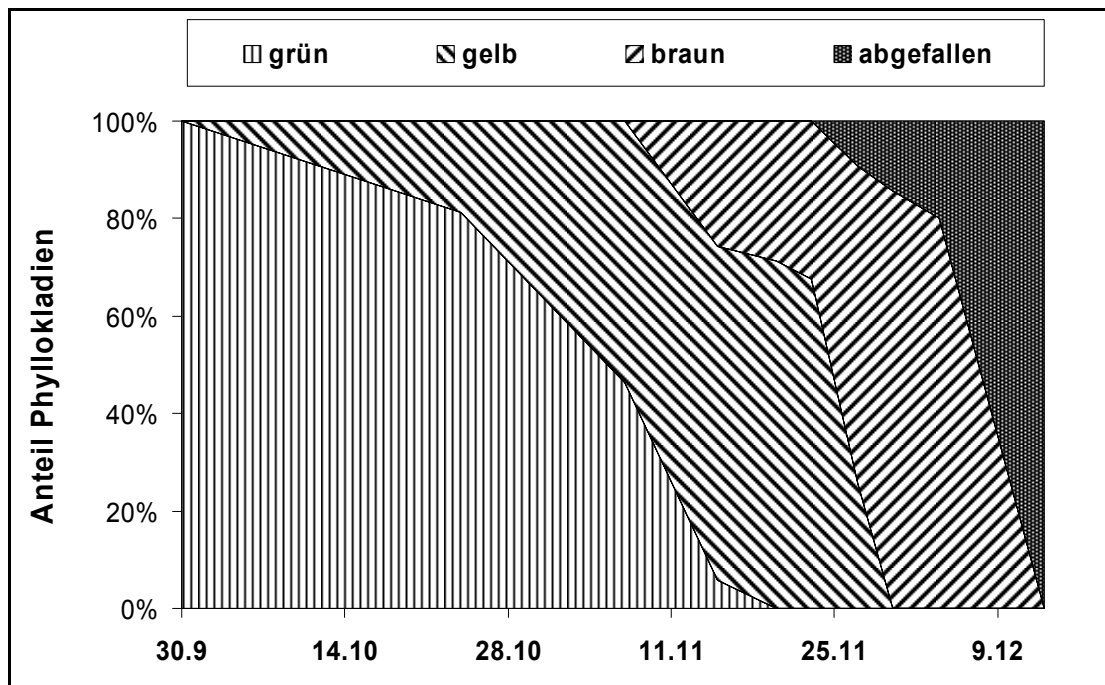


Abbildung 14: Anteile der Phyllokladien mit unterschiedlicher Färbung der feucht kultivierten Pflanzen im Gitterboxversuch 2006.

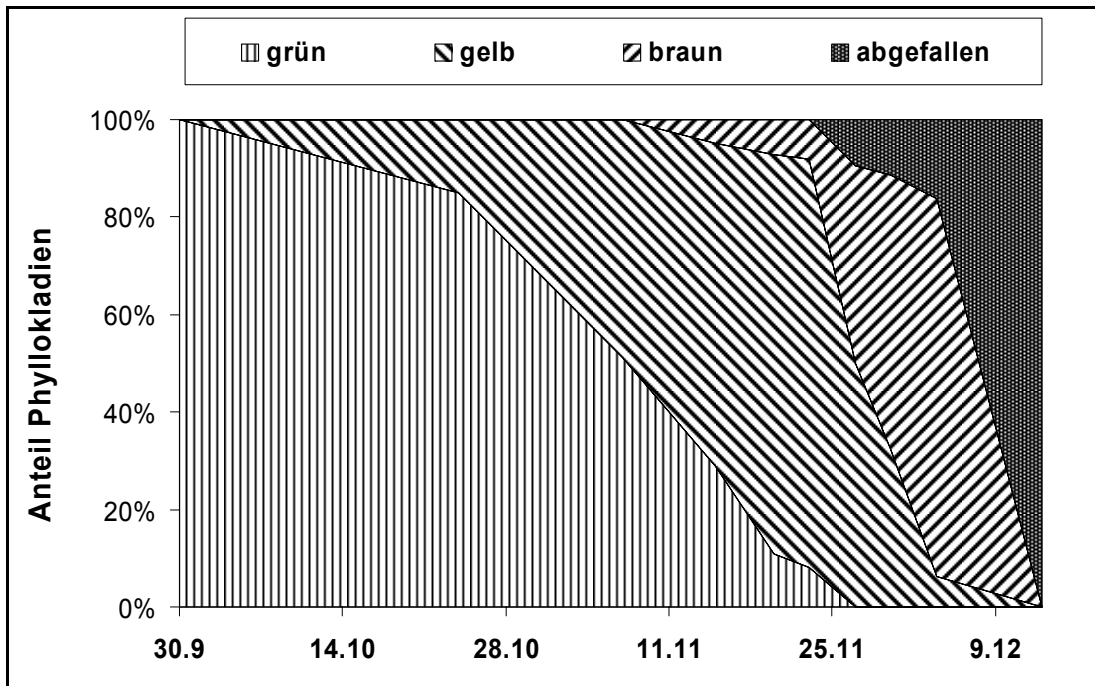


Abbildung 15: Anteile der Phyllokladien mit unterschiedlicher Färbung der trocken kultivierten Pflanzen im Gitterboxversuch 2006.

3.2.2.3 Wachstumsmodell

Die Abbildung 16 bis 18 zeigen den Wachstumsverlauf der Gesamtrieblänge der Spargelpflanzen in den Jahren 2005, 2006 und 2007. Als Wachstumsfunktion wird hier die sigmoidale Funktion die in Kapitel 2.16 beschrieben ist verwendet. Die Wachstumskurven aller Jahre und aller Varianten zeigen einen deutlich sigmoidalen Verlauf. Es werden auch die großen Streuungen zwischen den einzelnen Pflanzen einer Variante deutlich. Die Temperatursumme wurde als x-Wert verwendet, weil die meisten Wachstumsprozesse unter anderem Temperaturabhängig sind. Würde man die Kurven zeitabhängig berechnen, wäre die Kurvenanpassung an die Messwerte nicht schlechter. Die Parameter der Wachstumsfunktion und das Bestimmtheitsmaß können in Tabelle 7 eingesehen werden.

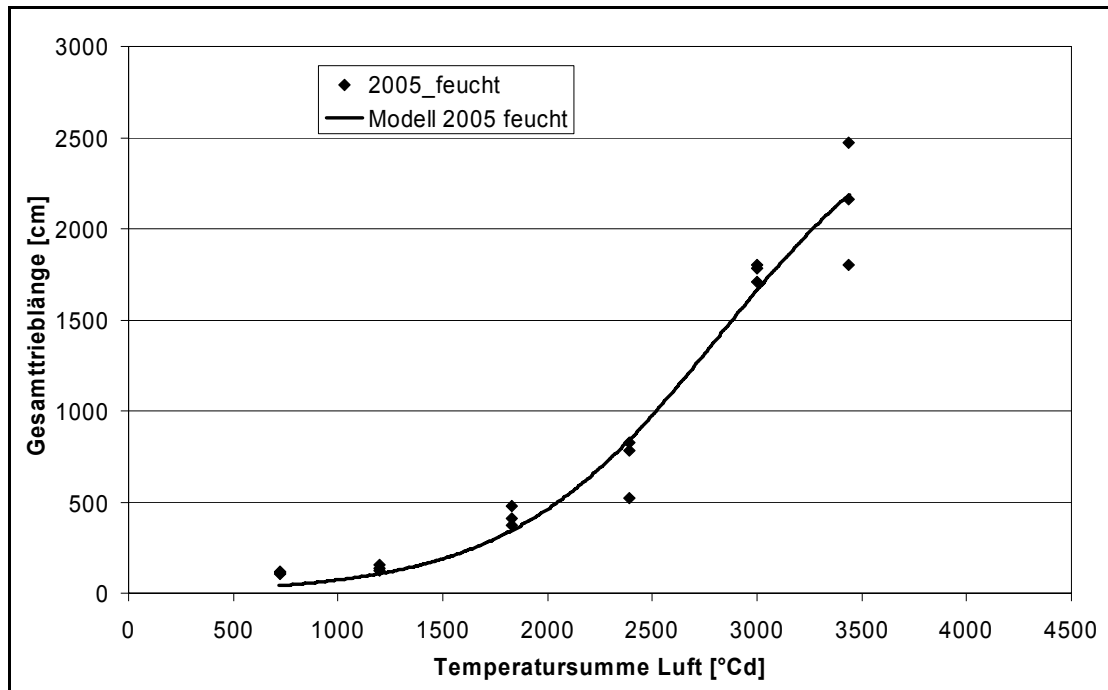


Abbildung 16: Gesamtrieblänge in Abhängigkeit der Temperatursumme der Luft in den Gitterboxen des Jahres 2005. Parameter und Bestimmtheitsmaß der Funktion siehe Tabelle 7.

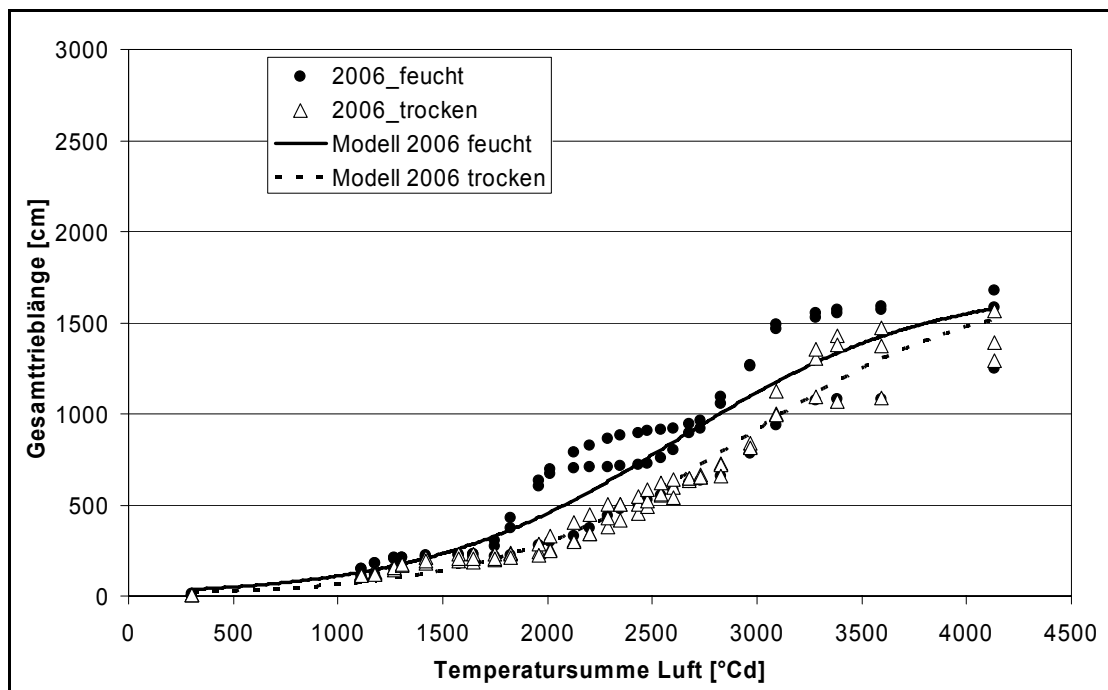


Abbildung 17: Gesamtrieblänge in Abhängigkeit der Temperatursumme der Luft in den Gitterboxen des Jahres 2006. Parameter und Bestimmtheitsmaß der Funktion siehe Tabelle 7.

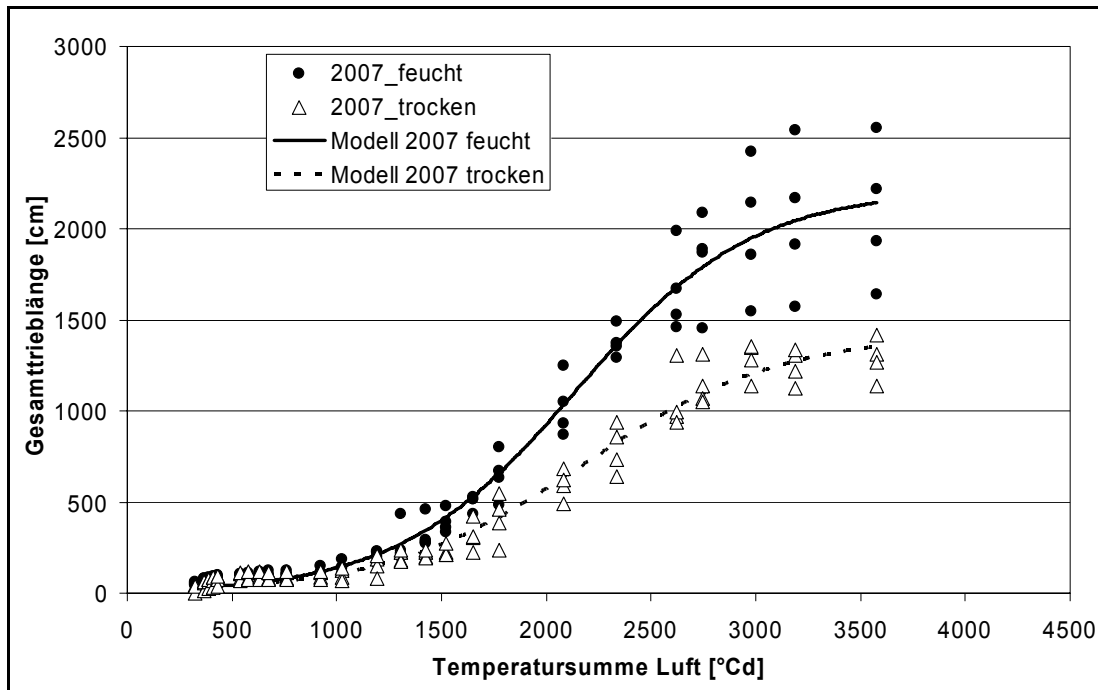


Abbildung 18: Gesamttrieblänge in Abhängigkeit der Temperatursumme der Luft in den Gitterboxen des Jahres 2007. Parameter und Bestimmtheitsmaß der Funktion siehe Tabelle 7.

Im Versuchsjahr 2005 und 2006 wurden je Variante lediglich drei von vier ehemals angelegten Wiederholungen aufgrund anbautechnischer Probleme ausgewertet. Im Jahr 2007 wurden je Variante vier Wiederholungen ausgewertet. In allen Jahren konnte eine sehr gute Anpassung der Wachstumsfunktion an die Messwerte erzielt werden, mit einem Bestimmtheitsmaß zwischen 0,87 und 0,97 (Tabelle 7). Deutliche Unterschiede zwischen den Jahren werden bei dem Parameter p_0 , der oberen Grenze der Funktion, ersichtlich. Diese liegt 2005 bei 2816 und im Jahr 2006 unabhängig von der Wasserversorgung bei 1700. Im Jahr 2007 unterscheidet sich dieser Parameter sehr deutlich zwischen den beiden Varianten. Auch beim Parameter p_1 , dem Wendepunkt der Funktion, werden Unterschiede zwischen den Jahren und den Varianten deutlich. Allerdings sind die Unterschiede zwischen den Jahren größer als die Unterschiede zwischen den Varianten. Die Wendepunkte der Funktion für die feuchten Varianten liegen immer niedriger als die Wendepunkte der Funktion für die trockenen Varianten. Auch die große Streuung der Werte innerhalb der Varianten wird vor allem bei der feuchten Variante im Jahr 2007 ersichtlich.

Tabelle 7: Modellparameter des Wachstumsmodells der Gesamtrieblänge der einzelnen Jahre und Varianten ($y = p_0 / (1 + e^{-(x - p_1)/p_2})$).

Jahr	Variante	p0		p1		p2		R ²
2005	feucht	2816,1	***	2816,8	***	500,7	***	0,96
2006	feucht	1704,2	***	2610,8	***	603,4	***	0,87
	trocken	1705,7	***	2916,5	***	583,3	***	0,96
2007	feucht	2214,0	***	2138,4	***	422,5	***	0,96
	trocken	1417,6	***	2183,5	***	465,0	***	0,97

n.s.: nicht signifikant, ~: $p \leq 0,1$, *: $p \leq 0,05$, **: $p \leq 0,01$, ***: $p \leq 0,001$;
 y= Gesamtrieblänge, x= Temperatursumme

3.3 Einfluss des Wasserangebotes auf den Ertrag unter Praxisbedingungen

Bei der Ertragsbestimmung auf der Praxisversuchsfläche konnten keine Wiederholungen angelegt werden. Während der Ernteperiode 2006 die vom 06.04. bis zum 29.05. dauerte, das entspricht 54 Erntetagen, erreichten die Pflanzen der bewässerten Variante einen Rohertrag von 11,6 t/ha die unbewässerten Pflanzen hingegen einen Ertrag von 9,8 t/ha (Abbildung 19).

Im Jahr 2007 dauerte die Ernteperiode vom 21.03. bis zum 08.05, was 49 Erntetagen entspricht. Die bewässerten Pflanzen erzielten in diesem Zeitraum 10,1 t/ha, die unbewässerten einen um 200 kg/ha höheren Rohertrag. Dieser Unterschied in der Ertragshöhe lässt sich durch den unterschiedlichen Ertragsverlauf in beiden Jahren erklären. Während die Pflanzen der bewässerten Variante im Jahr 2006 7 Tage vor den Pflanzen der unbewässerten Variante die ersten Stangen zum Ernten aufwiesen, konnten die unbewässerten Pflanzen im Jahr 2007 früher größere Erntemengen erzeugen. Durch die kurze Erntedauer im Jahr 2007 konnten die bewässerten Pflanzen ihr größeres Ertragspotential nicht voll ausschöpfen.

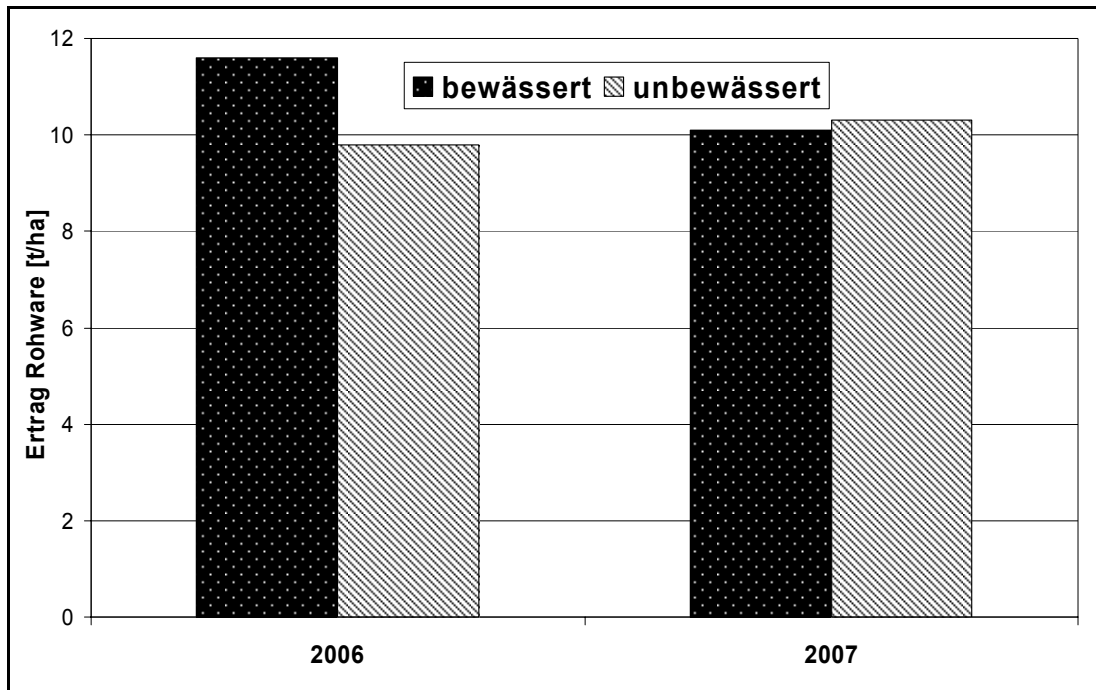


Abbildung 19: Einfluss der Bewässerung auf den Rohertrag [t/ha] der Jahre 2006 und 2007 der Praxisversuchsfläche.

3.4 Einfluss der Bewässerung auf das Speicherwurzelswachstum

3.4.1 Praxisfläche

3.4.1.1 Wurzellängendichte (WLD) der Speicherwurzeln

Die mittlere Wurzellängendichte der Speicherwurzeln zeigte bei den Pflanzen der bewässerten Variante einen deutlichen Jahresverlauf. Sowohl im Jahr 2005 als auch im Jahr 2006 stieg die ermittelte WLD von März bis Juli an, ging dann bis zum August zurück, um wieder bis in den Oktober anzusteigen (Tabelle 8). Eine mögliche Erklärung für diesen Verlauf wäre, dass vom Juli bis zum August sehr viele alte Wurzeln absterben, die Wurzelneubildung allerdings noch nicht so groß ist, als dass sie den Rückgang der WLD ausgleichen könnte. So wurden bei den Probenahmen im August immer die meisten weißen, somit die meisten jungen Speicherwurzeln gefunden werden. Es konnten ausschließlich signifikante Unterschiede zwischen dem Messtermin Juli 2006 und dem Messtermin März 2005 bzw. März 2006 und dem Messtermin Juli 2005 und März 2005 nachgewiesen werden.

Tabelle 8: Wurzellängendichte [$10^{-1} \text{ mm cm}^{-3}$] der Speicherwurzeln im Jahresverlauf mit und ohne Bewässerung. Mittelwert über den Abstand und die Tiefe (n=64 je Variante).

Variante	2005						2006				
	März	Mai	Juni	Juli	August	Oktober	März	Mai	Juli	August	Oktober
bew.	1,8 c	3,6 abc	3,4 abc	4,2 ab	3,0 abc	3,9 abc	2,0 bc	4,0 abc	4,4 a	3,5 abc	6,9 abc
unbew.	1,5 a	1,6 a	1,3 a	--	2,1 a	1,6 a	1,8 a	3,5 a	--	2,0 a	3,2 a
Sig.	n.s.	**	***		**	***	n.s.	n.s.		***	*

Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben innerhalb der gleichen Zeile unterscheiden sich signifikant nach Nemenyi-Test ($p \leq 0,05$). Signifikante Unterschiede innerhalb der gleichen Spalte berechnet mit U-Test (n.s.: nicht signifikant, ~: $p \leq 0,1$, *: $p \leq 0,05$, **: $p \leq 0,01$, ***: $p \leq 0,001$). --: keine Werte an diesem Termin.

Vergleicht man die räumliche Verteilung der Wurzeln im Jahresverlauf, wird ersichtlich, dass zu Jahresbeginn die Wurzeln lediglich einen sehr kleinen Bereich durchwurzeln. Dieser befindet sich in direkter Nähe zum Rhizom bis in eine Tiefe von 45 cm und in einem Abstand zur Reihenmitte von 45 cm.

Im Jahresverlauf erhöhte sich zunächst die WLD in diesem Wurzelraum (Abbildung 20 und Abbildung 21 sowie weitere Abbildungen Anhang Abbildung 4 bis Anhang Abbildung 23). Bis zum Messtermin Ende Juli war dann das gesamte beobachtete Bodenvolumen bis in eine Tiefe von 60 cm und einen Abstand von 90 cm zur Reihenmitte durchwurzelt. Die höchste WLD lag an jedem Termin in Rhizomnähe. Der Rückgang der WLD bis zum Messtermin Ende August konnte in allen Tiefen und Abständen erfasst werden. Bis zum Probennahmetermin Ende Oktober konnten dann wieder im gesamten Wurzelraum Speicherwurzeln nachgewiesen werden.

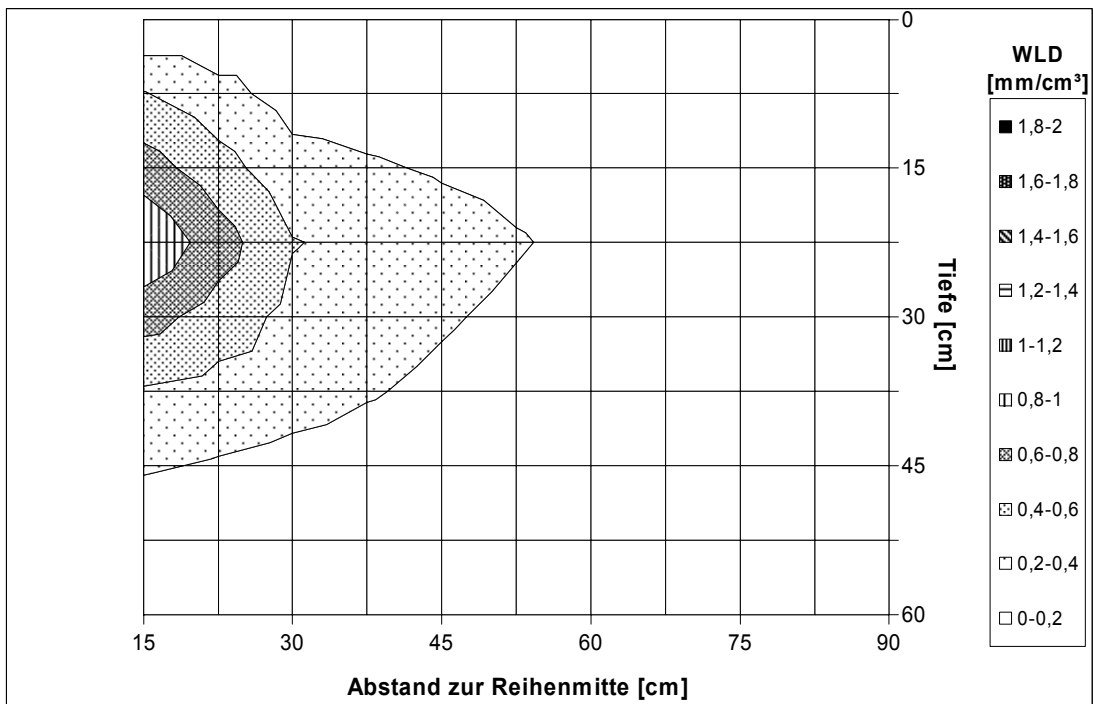


Abbildung 20: Verteilung der mittleren Wurzellängendichte der Speicherwurzeln [mm cm^{-3}] im Bodenprofil im März 2005 bei der bewässerten Variante.

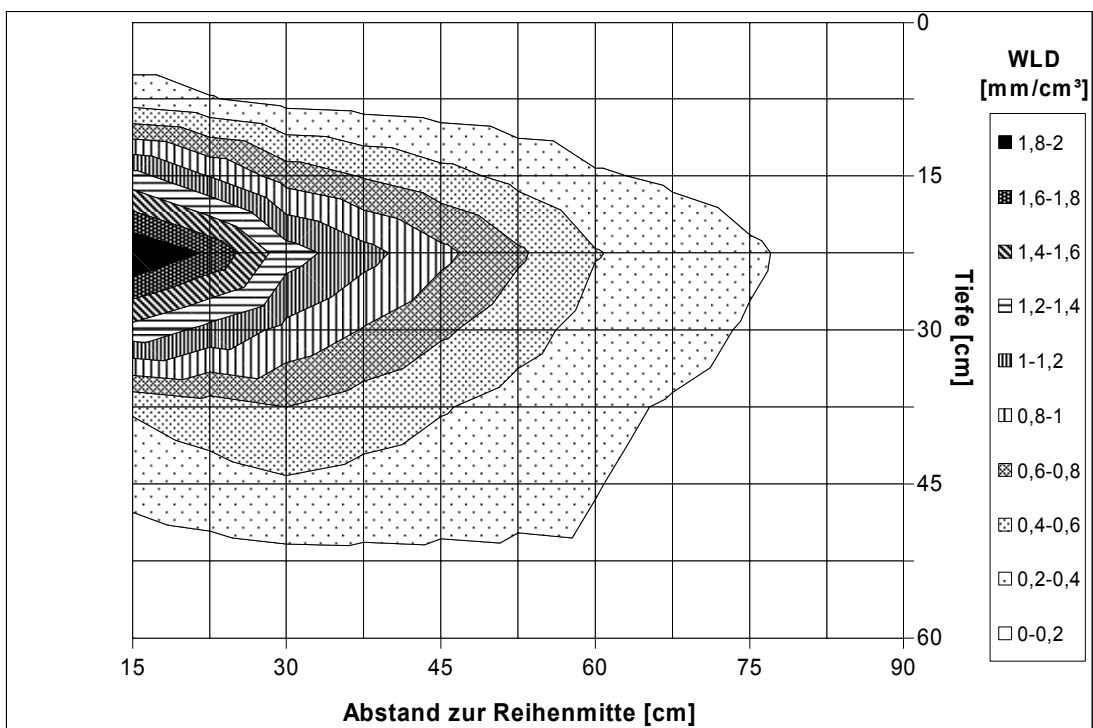


Abbildung 21: Verteilung der mittleren Wurzellängendichte der Speicherwurzeln [mm cm^{-3}] im Bodenprofil im Oktober 2005 bei der bewässerten Variante.

Aufgrund der Trockenheit im Juli beider Jahre war es nicht möglich, in der unbewässerten Variante Wurzelproben mit einem Bohrstock zu entnehmen. Die WLD war zu allen verfügbaren Terminen im Vergleich zur bewässerten Variante geringer. Signifikante Unterschiede konnten nur mit Ausnahme der Termine März 2005 und März 2006 sowie Mai 2006 nachgewiesen werden. Der Verlauf der mittleren WLD im Jahr 2006 gleicht dem Verlauf in der bewässerten Variante. Im Jahr 2005 steigt die mittlere WLD jedoch bis zum Messtermin August an und geht dann wieder zurück (Tabelle 8). Bei der Verteilung der Wurzeln im Bodenhorizont fällt auf, dass bei den Pflanzen der unbewässerten Variante keine Wurzeln unterhalb einer Tiefe von 45 cm zu finden waren (Abbildung 22 sowie Anhang Abbildung 10 bis Anhang Abbildung 14 und Anhang Abbildung 20 bis Anhang Abbildung 23).

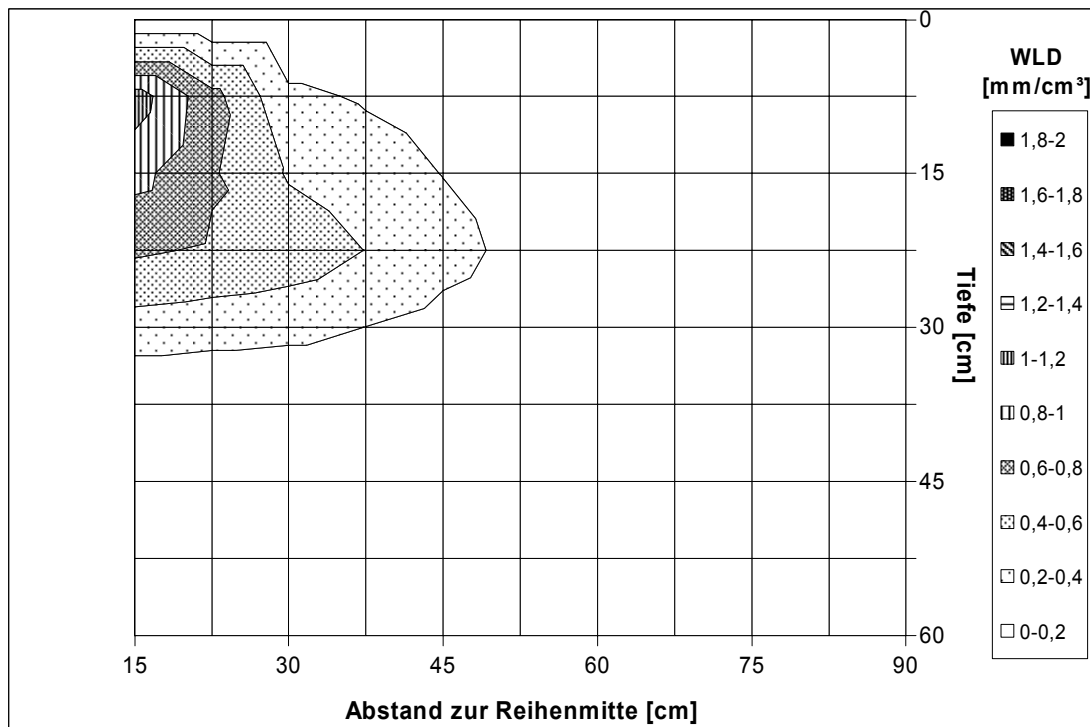


Abbildung 22: Verteilung der mittleren Wurzellängendichte der Speicherwurzeln [mm cm⁻³] im Bodenprofil im Oktober 2005 bei der unbewässerten Variante.

Ebenfalls auffällig ist, dass bei den Pflanzen der unbewässerten Variante die Wurzeln lediglich bis zu einem Abstand von 60 cm zur Reihemitte wurzelten. Somit ist der durchwurzelte Raum bei den unbewässerten Pflanzen wesentlich kleiner als bei den bewässerten Pflanzen. Die jeweils größten WLD der Speicherwurzeln wurden sowohl

bei der bewässerten als auch bei der unbewässerten Variante in den Tiefen 0-15 cm und 15-30 cm, sowie in einem Abstand von 15 cm zur Reihenmitte ermittelt. Der höchste ermittelte Wert der Speicherwurzel WLD wurde Ende Oktober 2006 mit $5,8 \text{ mm cm}^{-3}$ bei der bewässerten Variante und mit $3,6 \text{ mm cm}^{-3}$ bei der unbewässerten Variante festgestellt.

3.4.1.2 Wurzeltrockenmassendichte (WTMD) der Speicherwurzeln

Die Wurzel-Trockenmassen-Dichte der Speicherwurzeln der unbewässerten Pflanzen lag an allen Terminen unter den Werten der bewässerten (Tabelle 9). Im Oktober 2006 wies die bewässerte Variante mit einem Mittelwert von $3,0 \text{ mg cm}^{-3}$ den dreifachen Gehalt im Vergleich zur unbewässerten Variante auf. Mit Ausnahme der Termine März 2005, März und Mai 2006 konnten signifikante Unterschiede zwischen den Varianten ermittelt werden. Da ein sehr enger Zusammenhang zwischen der WLD und der WTMD (Tabelle 15) besteht, ist die Verteilung der beiden Wurzelparameter im Bodenprofil vergleichbar. Daher wird hier auf eine genauere Beschreibung dieses Parameters verzichtet.

Tabelle 9: Wurzeltrockenmassendichte [mg cm^{-3}] der Speicherwurzeln im Jahresverlauf mit und ohne Bewässerung. Mittelwert über den Abstand und die Tiefe (n=64 je Variante).

Variante	2005						2006				
	März	Mai	Juni	Juli	August	Oktober	März	Mai	Juli	August	Oktober
bew.	0,6 a	0,8 a	0,5 a	0,7 a	0,9 a	1,4 a	0,5 a	1,2 a	0,7 a	0,7 a	3,0 a
unbew.	0,3 ab	0,5 ab	0,2 a	--	0,8 ab	0,7 ab	0,5 ab	1,0 ab	--	0,5 ab	1,0 b
Sig.	n.s.	**	***		**	***	n.s.	n.s.		***	*

Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben innerhalb der gleichen Zeile unterscheiden sich signifikant nach Nemenyi-Test ($p \leq 0,05$). Signifikante Unterschiede innerhalb der gleichen Spalte berechnet mit U-Test (n.s.: nicht signifikant, ~: $p \leq 0,1$, *: $p \leq 0,05$, **: $p \leq 0,01$, ***: $p \leq 0,001$). --: keine Werte an diesem Termin.

3.4.1.3 Speicherwurzeldurchmesser

Der mittlere Durchmesser der Speicherwurzeln zeigte in der unbewässerten Variante mit Ausnahme der Termine März und Oktober 2005 immer den höheren Wert im Vergleich

zur bewässerten Variante (Tabelle 10). Der geringste Durchmesser wurde in beiden Varianten im März 2006 mit 3,8 mm gemessen. Der größte Durchmesser wurde im März 2005 mit 6,6 mm bei den bewässerten bzw. 5,7 mm bei den unbewässerten Pflanzen gemessen.

Tabelle 10: Durchmesser [mm] der Speicherwurzeln im Jahresverlauf mit und ohne Bewässerung. Mittelwert über den Abstand und die Tiefe (n=64 je Variante).

Variante	2005						2006					HSD (5%)
	März	Mai	Juni	Juli	August	Oktober	März	Mai	Juli	August	Oktober	
bew.	6,6 a	5,5 b	4,1 de	4,5 cd	4,6 cd	5,1 bc	3,8 e	4,1 de	4,1 de	4,6 cd	4,3 de	0,6
unbew.	5,7 a	5,6 ab	4,5 cd	--	4,8 bc	4,9 abc	3,8 d	4,3 cd	--	5,1 ab	4,9 abc	0,8
Sig.	**	n.s.	n.s.		n.s.	n.s.	n.s.	n.s.		*	**	

Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben innerhalb der gleichen Zeile unterscheiden sich signifikant nach Tukey-Test ($p \leq 0,05$). Signifikante Unterschiede innerhalb der gleichen Spalte berechnet mit F-Test (n.s.: nicht signifikant, ~: $p \leq 0,1$, *: $p \leq 0,05$, **: $p \leq 0,01$, ***: $p \leq 0,001$). --: keine Werte an diesem Termin.

3.4.1.4 Mittlerer-halber-Wurzelabstand (mhWa) der Speicherwurzeln

Der mittlere-halbe-Wurzelabstand wird mit der in Kapitel 2.9 genannten Formel aus den Werten der WLD berechnet. Je höher die WLD ist desto geringer ist der mhWa. Der geringste mhWa wurde im Oktober 2006 in der bewässerten Parzelle mit 0,74 cm festgestellt. In der unbewässerten Parzelle wurde zum selben Zeitpunkt ebenfalls das absolute Minimum mit 0,94 cm ermittelt. Signifikante Unterschiede zwischen den Varianten konnten nur im März 2005 und im August sowie Oktober 2006 nachgewiesen werden (Tabelle 11). Da bei der Berechnung des mhWa der Durchmesser nicht mitberücksichtigt wird, muss der Messwert um den Durchmesser bereinigt werden. Der mittlere Durchmesser der Speicherwurzeln über alle Varianten beträgt 0,47 cm, dementsprechend reduziert sich der mhWa.

Die Mittelwerte der beiden Varianten des mhWa unterschieden sich nur an drei Terminen signifikant. Bei den Werten der unbewässerten Variante muss allerdings berücksichtigt werden, dass sehr viele Messwerte nicht vorhanden waren, weil in der unbewässerten Variante in den Abständen 60 cm und 90 cm und in den Tiefen 30-45 cm und 45-60 cm häufig keine Speicherwurzeln gefunden wurden, während in der

bewässerten Variante an diesen Punkten sehr hohe Wurzelabstände vorlagen. Somit bleibt der Mittelwert der unbewässerten Variante sehr niedrig, während der Mittelwert der bewässerten Variante größer wird.

Tabelle 11: Mittlerer halber Wurzelabstand [cm] der Speicherwurzeln im Jahresverlauf mit und ohne Bewässerung. Mittelwert über den Abstand und die Tiefe (n=64 je Variante).

Variante	2005						2006				
	März	Mai	Juni	Juli	August	Oktober	März	Mai	Juli	August	Oktober
bew.	3,8 ab	3,0 ab	3,8 ab	3,5 a	3,6 ab	3,5 ab	3,7 b	3,5 ab	3,8 ab	3,5 ab	2,6 ab
unbew.	5,4 a	3,9 ab	3,5 c	--	3,7 ab	3,5 bd	4,3 ab	3,1 ab	--	2,1 cd	3,9 bd
Sig.	*	n.s.	n.s.		n.s.	n.s.	n.s.	n.s.		**	*

Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben innerhalb der gleichen Zeile unterscheiden sich signifikant nach Nemenyi-Test ($p \leq 0,05$). Signifikante Unterschiede innerhalb der gleichen Spalte berechnet mit U-Test (n.s.: nicht signifikant, ~: $p \leq 0,1$, *: $p \leq 0,05$, **: $p \leq 0,01$, ***: $p \leq 0,001$). --: keine Werte an diesem Termin.

3.4.1.5 Spezifische Wurzellänge (SWL) der Speicherwurzeln

Die Entwicklung der mittleren spezifischen Wurzellänge der Speicherwurzeln zeigt einen deutlichen Jahresverlauf (Tabelle 12). Bei den Pflanzen der bewässerten Variante wurde die jeweils höchste SWL im Frühsommer Juni/ Juli beider Jahre mit $1,0 \text{ m gTM}^{-1}$ festgestellt.

Tabelle 12: Spezifische Wurzellänge [m gTM^{-1}] der Speicherwurzeln im Jahresverlauf mit und ohne Bewässerung. Mittelwert über den Abstand und die Tiefe (n=64 je Variante).

Variante	2005						2006				
	März	Mai	Juni	Juli	August	Oktober	März	Mai	Juli	August	Oktober
bew.	0,5 ab	0,6 ab	1,0 c	0,8 ab	0,5 ab	0,5 a	0,6 bc	0,7 ab	1,0 ab	0,7 ab	0,5 ab
unbew.	0,8 a	0,7 ab	0,8 c	--	0,4 ab	0,4 b	0,6 ab	0,5 ab	--	0,5 c	0,5 b
Sig.	**	n.s.	n.s.		n.s.	n.s.	n.s.	n.s.		*	n.s.

Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben innerhalb der gleichen Zeile unterscheiden sich signifikant nach Nemenyi-Test ($p \leq 0,05$). Signifikante Unterschiede innerhalb der gleichen Spalte berechnet mit U-Test (n.s.: nicht signifikant, ~: $p \leq 0,1$, *: $p \leq 0,05$, **: $p \leq 0,01$, ***: $p \leq 0,001$). --: keine Werte an diesem Termin.

Bei den Pflanzen der unbewässerten Variante hingegen wurde in beiden Jahren die höchste spezifische Wurzellänge zu Vegetationsbeginn mit $0,8 \text{ m gTM}^{-1}$ bzw. $0,6 \text{ m gTM}^{-1}$ ermittelt. In beiden Varianten wurden die niedrigsten SWL im Oktober beider Jahre festgestellt. Signifikante Unterschiede zwischen den Varianten konnten nur im März 2005 und im August 2006 nachgewiesen werden.

3.4.1.6 Speicherwurzelrockensubstanz

Die Trockensubstanzgehalte der Speicherwurzeln der unbewässerten Pflanzen lag an jedem Probennahmetermin über den Trockensubstanzgehalten der bewässerten (Tabelle 13). Im Jahr 2005 unterschieden sich die beiden Varianten an allen Terminen signifikant, im Jahr 2006 konnte lediglich im August ein Unterschied statistisch abgesichert werden. Die jeweils höchsten Gehalte lagen in beiden Varianten und in beiden Jahren im Oktober, also am Vegetationsende, vor. Auffällig ist der signifikante Rückgang der Trockensubstanz von 25 % auf 20 % in der unbewässerten Variante von Oktober 2005 bis März 2006. Auffällig ist zudem der sichtbare Jahresgang in beiden Varianten. Die Gehalte fielen jeweils von einem hohen Niveau zu Vegetationsbeginn bis zum Frühsommer auf den jeweils signifikant geringsten Gehalt und stiegen dann wieder auf ein hohes Niveau.

3.4.1.7 Gesamt-Speicherwurzellänge je Pflanze

Während des Untersuchungszeitraumes nahm die Gesamtspeicherwurzellänge stark zu (Abbildung 23). Bei den Pflanzen der bewässerten Variante stieg die Speicherwurzellänge von 62 m/Pflanze auf 246 m/Pflanze und bei den der unbewässerten Variante von 53 m/Pflanze auf 116 m/Pflanze. Im Verlauf fällt vor allem der Wert der bewässerten Variante im März 2006 auf. Während bei der unbewässerten Variante die Speicherwurzellänge von Oktober 2005 bis März 2006 nahezu konstant bleibt, sinkt der Wert in der bewässerten Variante sehr stark auf dasselbe Niveau wie im März 2005.

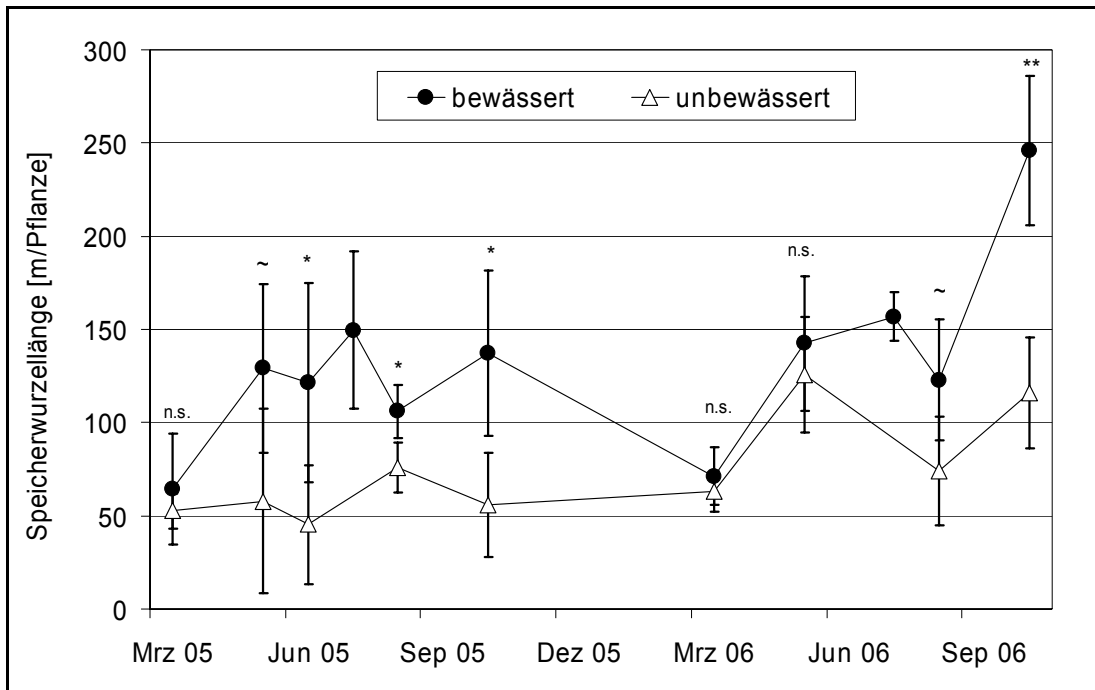


Abbildung 23: Berechnete Speicherwurzellänge [m/Pflanze] bewässerter und unbewässerter Spargelpflanzen. Fehlerbalken kennzeichnen Standardabweichung. Signifikanz mit F-Test (n.s.: nicht signifikant, ~: $p \leq 0,1$, *: $p \leq 0,05$, **: $p \leq 0,01$, ***: $p \leq 0,001$). $n = 4$ je Termin und Variante.

Tabelle 13: Trockensubstanz [%] der Speicherwurzeln im Jahresverlauf mit und ohne Bewässerung. Mittelwert über den Abstand und die Tiefe (n=64 je Variante).

Variante	2005						2006					HSD (5%)
	März	Mai	Juni	Juli	August	Oktober	März	Mai	Juli	August	Oktober	
bewässert	16,2 b	14,0 c	9,7 e	11,5 de	14,0 c	19,3 a	19,1 a	16,7 b	11,9 d	13,1 cd	20,8 a	2,1
unbewässert	17,9 cd	15,6 cde	13,7 e	--	17,4 cd	25,1 a	20,1 bc	17,7 cd	--	18,7 c	22,2 ab	3,6
Sig.	**	~	***		***	***	n.s.	n.s.		***	n.s.	

Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben innerhalb der gleichen Zeile unterscheiden sich signifikant nach Tukey-Test ($p \leq 0,05$). Signifikante Unterschiede innerhalb der gleichen Spalte berechnet mit F-Test (n.s.: nicht signifikant, ~: $p \leq 0,1$, *: $p \leq 0,05$, **: $p \leq 0,01$, ***: $p \leq 0,001$). --: keine Werte an diesem Termin.

Tabelle 14: Trockensubstanz [%] der Faserwurzeln im Jahresverlauf mit und ohne Bewässerung. Mittelwert über den Abstand und die Tiefe (n=64 je Variante).

Variante	2005						2006					HSD (5%)
	März	Mai	Juni	Juli	August	Oktober	März	Mai	Juli	August	Oktober	
bewässert	13,2 de	13,3 de	16,1 c	12,1 e	12,5 de	19,6 ab	19,7 a	16,8 bc	15,1 cde	13,3 de	17,5 bc	2,8
unbewässert	12,9 d	13,4 d	15,9 bcde	--	16,2 bcd	24,6 a	17,6 bc	15,4 cde	--	18,9 b	23,4 a	3,2
Sig.	n.s.	n.s.	n.s.		***	***	*	~		***	***	

Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben innerhalb der gleichen Zeile unterscheiden sich signifikant nach Tukey-Test ($p \leq 0,05$). Signifikante Unterschiede innerhalb der gleichen Spalte berechnet mit F-Test (n.s.: nicht signifikant, ~: $p \leq 0,1$, *: $p \leq 0,05$, **: $p \leq 0,01$, ***: $p \leq 0,001$). --: keine Werte an diesem Termin.

3.4.1.8 Zusammenhang der Speicherwurzelmerkmale

Es gibt sehr enge Zusammenhänge zwischen den einzelnen Wurzelmerkmalen (Tabelle 15). Lediglich das Merkmal Trockensubstanzgehalt zeigte keine Zusammenhänge mit den anderen Parametern. Wenn Zusammenhänge nachgewiesen werden konnten, lagen diese in einem sehr hohen Bereich. Es gibt keine Unterschiede zwischen den Jahren. Wenn in einem Jahr ein enger Zusammenhang bestand, konnte dieser im Folgejahr in einem ähnlichen Maß nachgewiesen werden.

Tabelle 15: Bestimmtheitsmaße (R^2) der Speicherwurzelmerkmale

		Frishmasse	Trockenmasse	Trockensubstanz	WLD	WFMD
Trockenmasse	2005	0,94				
	2006	0,96				
Trockensubstanz	2005	0,08	0,16			
	2006	0,06	0,10			
WLD	2005	0,95	0,85	0,06		
	2006	0,95	0,87	0,05		
WFMD	2005		0,95	0,08	0,94	
	2006		0,96	0,06	0,95	
WTMD	2005	0,92		0,16	0,83	0,94
	2006	0,96		0,10	0,87	0,96

3.4.2 Ganze Pflanzen

3.4.2.1 Speicherwurzelfrischmasse

Die zwei Varianten unterschieden sich hinsichtlich der ausgegrabenen Speicherwurzelfrischmasse an allen Proberodungen (Tabelle 16). Während in der bewässerten Variante die Pflanzen im Versuchszeitraum ihr mittleres Speicherwurzelgewicht von 2120 g auf 4600 g mehr als verdoppelten, stieg bei den Pflanzen der unbewässerten Variante das Gewicht von 1019 g auf 2948 g, das sich somit fast verdreifachte.

Im Jahr 2005 stiegen in beiden Varianten die Wurzelmassen der Pflanzen signifikant an. 2006 konnten nur noch die bewässerten Pflanzen ihr Speicherwurzelgewicht signifikant steigern von 3686 g auf 4797 g, während die Pflanzen in der unbewässerten Variante nur noch leichte Speicherwurzelmassenzuwächse verzeichnen konnten. Vom Herbsttermin 2006 bis zum Frühjahrstermin 2007 gingen die Speicherwurzelfrischmassen leicht zurück, während die unbewässerten Pflanzen ihre Masse wiederum leicht erhöhten.

Tabelle 16: Speicherwurzelfrischmasse [g/Pflanze] der komplett ausgegrabenen Pflanzen zu verschiedenen Terminen (n=8 Pflanzen je Variante).

Variante	2005		2006		2007	HSD (5%)
	Frühjahr	Herbst	Frühjahr	Herbst	Frühjahr	
bewässert	2120 c	3626 b	3686 b	4797 a	4600 a	630
unbewässert	1019 c	2204 b	2618 ab	2781 ab	2948 a	601
Signifikanz	***	***	***	***	***	

Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben innerhalb der gleichen Zeile unterscheiden sich signifikant nach Tukey-Test ($p \leq 0,05$). Signifikante Unterschiede innerhalb der gleichen Spalte berechnet mit F-Test (n.s.: nicht signifikant, ~: $p \leq 0,1$, *: $p \leq 0,05$, **: $p \leq 0,01$, ***: $p \leq 0,001$).

3.4.2.2 Speicherwurzel trockenmasse

Mit Ausnahme des ersten Termins konnten an allen Proberodungen signifikante Unterschiede zwischen den beiden Varianten hinsichtlich der Speicherwurzel trockenmasse nachgewiesen werden (Tabelle 17). In der bewässerten Variante stieg die Speicherwurzel trockenmasse während des Untersuchungszeitraums von 381 g auf 1017 g je Pflanze, in der unbewässerten von 202 g auf 766 g. Die größte Differenz in den Trockenmassen wurde im Herbst 2006 mit 450 g ermittelt. Diese fiel allerdings bis zum Frühjahrstermin des Folgejahres auf 250 g zurück. In der unbewässerten Parzelle ist der Verlauf der Trockenmassen vergleichbar mit den Frischmassen. In der bewässerten Parzelle unterschied sich der Frühjahrstermin 2007 nicht signifikant vom Frühjahrstermin 2006.

Tabelle 17: Speicherwurzeltrockenmassen [g/Pflanze] der komplett ausgegrabenen Pflanzen zu den verschiedenen Terminen (n=8 Pflanzen je Variante).

Variante	2005		2006		2007	HSD (5%)
	Frühjahr	Herbst	Frühjahr	Herbst	Frühjahr	
bewässert	381 d	817 c	896 bc	1158 a	1017 ab	191
unbewässert	202 c	557 b	713 ab	708 ab	766 a	164
Signifikanz	n.s.	**	**	**	**	

Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben innerhalb der gleichen Zeile unterscheiden sich signifikant nach Tukey-Test ($p \leq 0,05$). Signifikante Unterschiede innerhalb der gleichen Spalte berechnet mit F-Test (n.s.: nicht signifikant, ~: $p \leq 0,1$, *: $p \leq 0,05$, **: $p \leq 0,01$, ***: $p \leq 0,001$).

3.4.3 Zusammenhang zwischen Wurzelmerkmalen aus Bohrstockproben und aus vollständig ausgegrabenen Pflanzen

In Abbildung 24 wird der gute Zusammenhang zwischen der Wurzelfrischmassendichte, die mit den Bohrstockproben ermittelt wurde und der durch Ausgraben ganzer Pflanzen ermittelten Speicherwurzelfrischmasse dargestellt. Das hohe Bestimmtheitsmaß von 0,8 zeigt die Güte des Zusammenhangs, daneben konnte dieser Wert mit einer Fehlerwahrscheinlichkeit kleiner 5 % statistisch abgesichert werden. Aus dem guten Zusammenhang dieser beiden Wertepaare ist abzuleiten, dass die Stichproben, die mit dem Bohrstock entnommen werden sehr gut die tatsächliche Wurzelmasse abbilden.

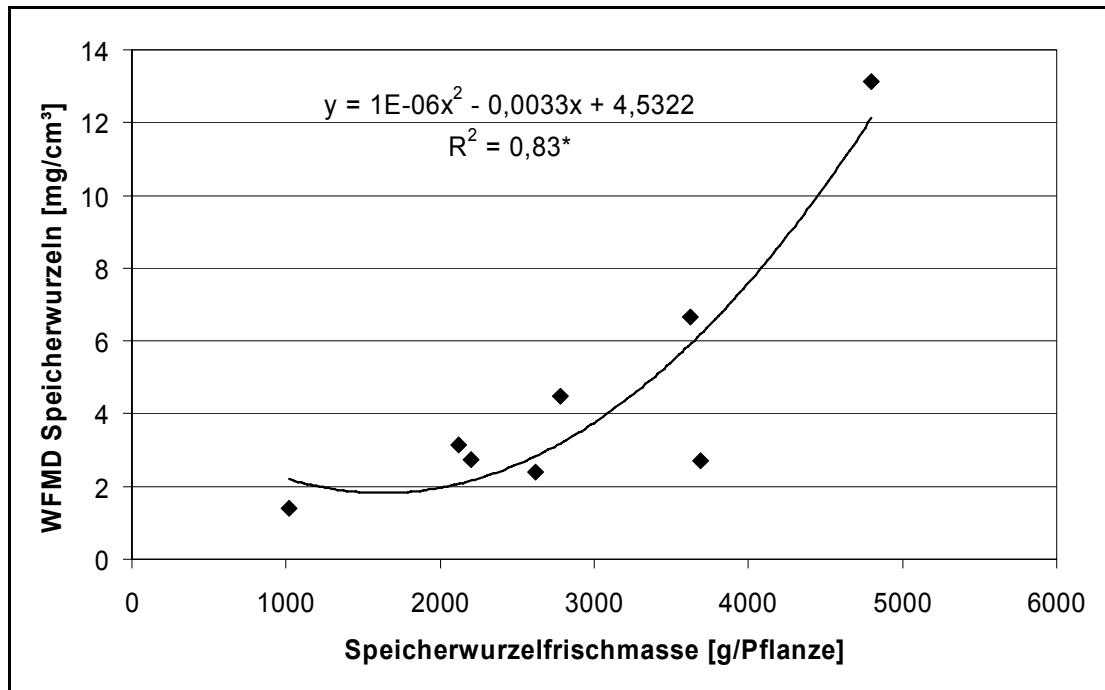


Abbildung 24: Zusammenhang zwischen mittlerer Speicherwurzelfrischmasse [g/Pflanze] und der mittleren Wurzelfrischmassendichte [mg cm⁻³] der Speicherwurzeln. *: $p \leq 0,05$.

3.4.4 Gitterboxen

3.4.4.1 Speicherwurzelmerkmale

Tabelle 18 gibt die Auswertung des Gitterbox-Versuches hinsichtlich der Speicherwurzelmerkmale an. Die mittleren Wassermengen (Bewässerung plus Niederschlag) unterscheiden sich signifikant voneinander. Während die feuchte Variante des Jahres 2006 im Mittel 484 L/Pflanze erhielt, wurden der trockenen Variante durchschnittlich nur 422 L/Pflanze verabreicht. Im Jahr 2007 erhielt die feuchte Variante im Mittel 362 L/Pflanze und die trockenen Variante 321 L/Pflanze. Mit diesen Wassermengen konnte die Pflanzen der -200 hPa Variante eine mittlere Speicherwurzelfrischmasse von 2402 g/Pflanze im Jahr 2006 und 2664 g/Pflanze in 2007 und die Pflanzen der -700 hPa Variante eine signifikant niedrigere Frischmasse von 1330 g/Pflanze bzw. 2045 g/Pflanze aufbauen. Ebenfalls signifikant unterschiedlich war die Speicherwurzel trockenmasse der beiden Varianten mit 677 g/Pflanze und 828 g/Pflanze bzw. 389 g/Pflanze und 643 g/Pflanze.

Tabelle 18: Wassermenge [L/Pflanze], Frischmasse [g/Pflanze], Trockensubstanz [%], Trockenmasse [g/Pflanze], sowie die Anzahl [St./Pflanze], die durchschnittliche Länge [cm], die Gesamtlänge [cm/Pflanze] und die gemessene Länge an der Plexiglasscheibe [cm] der Speicherwurzeln der Gitterbox-Versuche (n=3 Pflanzen je Variante).

Jahr	Variante	Wasser- menge	FM SpW	TS SpW	TM SpW	SpW An- zahl	SpW Länge Ø	SpW Länge ges.	SpW Länge Scheibe
2005	feucht	453	2000	33,3	667	207	47	9613	1530
2006	feucht	484	2402	28,3	677	201	47	9383	770
	trocken	422	1330	29,2	389	132	33	4440	505
2007	feucht	362	2664	31,1	828	216	50	10806	944
	trocken	321	2045	31,5	643	177	43	7575	573
Sig. F-Test		*	***	n.s.	***	***	***	***	***

Signifikante Unterschiede berechnet für Hauptfaktor „Bewässerung“ F-Test (n.s.: nicht signifikant, *: $p \leq 0,05$, **: $p \leq 0,01$, ***: $p \leq 0,001$).

Die Gesamtwurzellänge der Speicherwurzeln, die aus der mittleren Speicherwurzellänge und der Speicherwurzelanzahl berechnet wurde, unterschied sich ebenfalls statistisch absicherbar. Dabei konnte die feuchte Variante mit 9,4 m/Pflanze im Jahr 2006 und 10,8 m/Pflanze im Jahr 2007 im Vergleich zur trockenen Variante eine in 2006 um mehr als doppelt so große Gesamtlänge und im Jahr 2007 eine um 1,5-fache Gesamtlänge erzielen. Vergleicht man die feuchte Variante 2005 mit der feuchten Variante 2006 so fällt auf, dass die Speicherwurzelfrischmasse sich um 400 g unterscheidet, die Trockenmasse allerdings nur um 10 g. Auffällig ist des weiteren die doppelt so große Speicherwurzellänge an der Scheibe im Jahr 2005 trotz der niedrigeren Frischmasse. Der Trockensubstanzgehalt der Pflanzen in den trockenen Varianten lag in beiden Jahre etwas höher als in den feuchten Varianten. Signifikante Unterschiede konnten auch bei der gemessenen Speicherwurzellänge an der Scheibe zwischen den Bewässerungsstufen nachgewiesen werden. Vergleicht man die mittlere Speicherwurzellänge an der Scheibe zwischen den feuchten Varianten 2005 und 2006 fällt der deutliche Unterschied auf. Während 2005 eine mittlere Länge von 1530 cm gemessen wurde, konnte 2006 bei den gleich kultivierten Pflanzen eine mittlere Länge von nur 770 cm gemessen werden.

3.4.4.2 Wurzelwachstumsmodell

Abbildung 25 zeigt den Verlauf des Speicherwurzelswachstums an der Plexiglasscheibe der Pflanzen des Jahres 2005. Es wird der sigmoidale Verlauf des Wachstums deutlich.

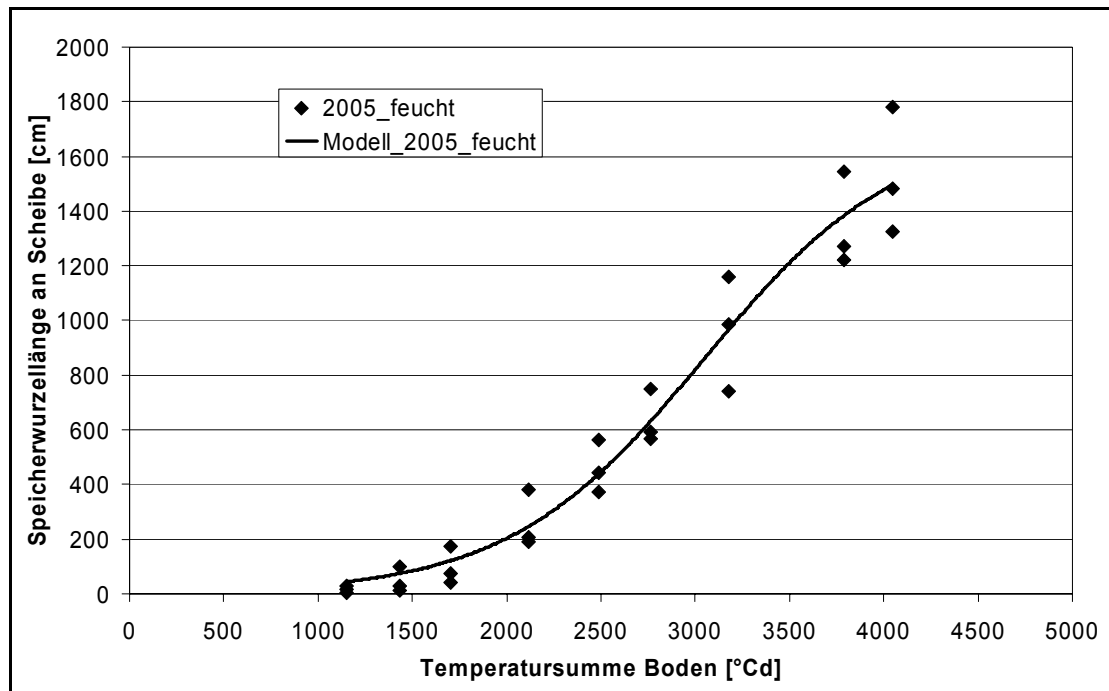


Abbildung 25: Einfluss der Temperatursumme auf die Länge der Speicherwurzeln an der Plexiglasscheibe der Gitterboxen 2005. Parameter und Bestimmtheitsmaß der Funktion siehe Tabelle 19.

Die Parameter der Wachstumskurve sind in Tabelle 19 einzusehen. Ein sehr hohes Bestimmtheitsmaß von 0,96 zeigt die sehr gute Anpassung der Kurve an die Daten. Allerdings konnten aufgrund von Schädlingsbefall einer einzelnen Pflanze und durch Pflanzenausfälle nur drei Pflanzen für das Modell herangezogen werden.

Die zwei Varianten zeigen ein deutlich unterschiedliches Wachstum. Die unterschiedliche Wurzellänge am Ende des Versuchsjahres mit einer mittleren Wurzellänge von 770 cm bei der feuchten Variante bzw. 505 cm bei der trockenen kultivierten Variante konnte statistisch abgesichert werden (Tabelle 18). Ebenfalls konnte 2006 eine sehr gute Anpassung der Wachstumsfunktion an die Messwerte erzielt werden, mit einem R^2 von 0,94 bzw. 0,92 (Tabelle 19).

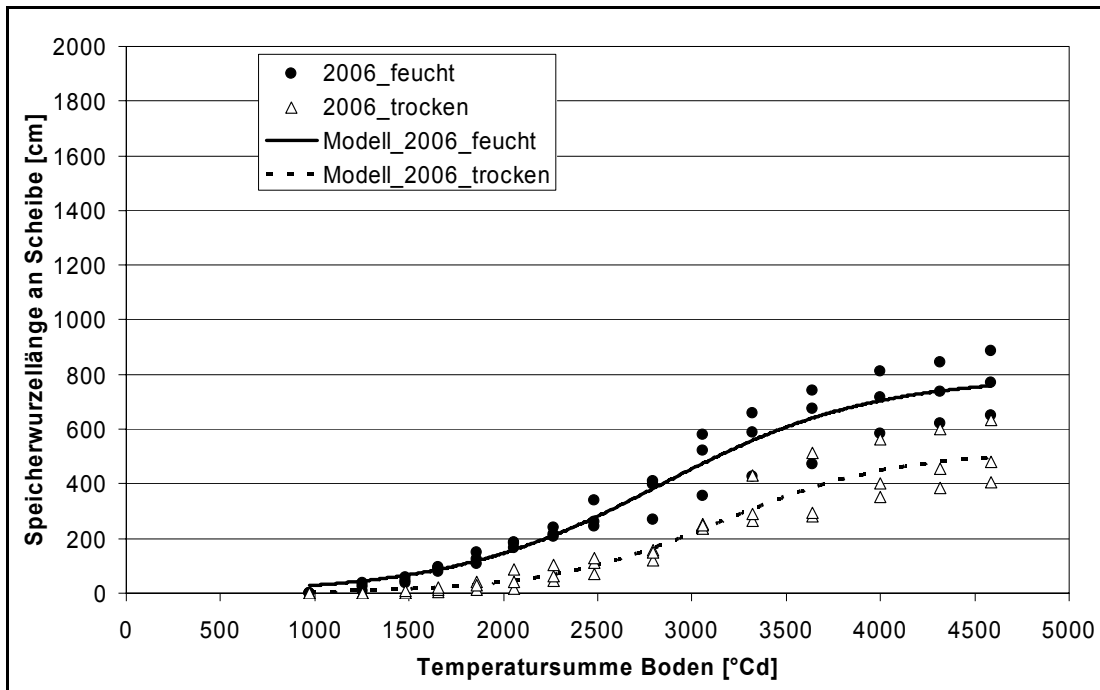


Abbildung 26: Einfluss der Temperatursumme auf die Länge der Speicherwurzeln an der Plexiglasscheibe der Gitterboxen 2006. Parameter und Bestimmtheitsmaß der Funktion siehe Tabelle 19.

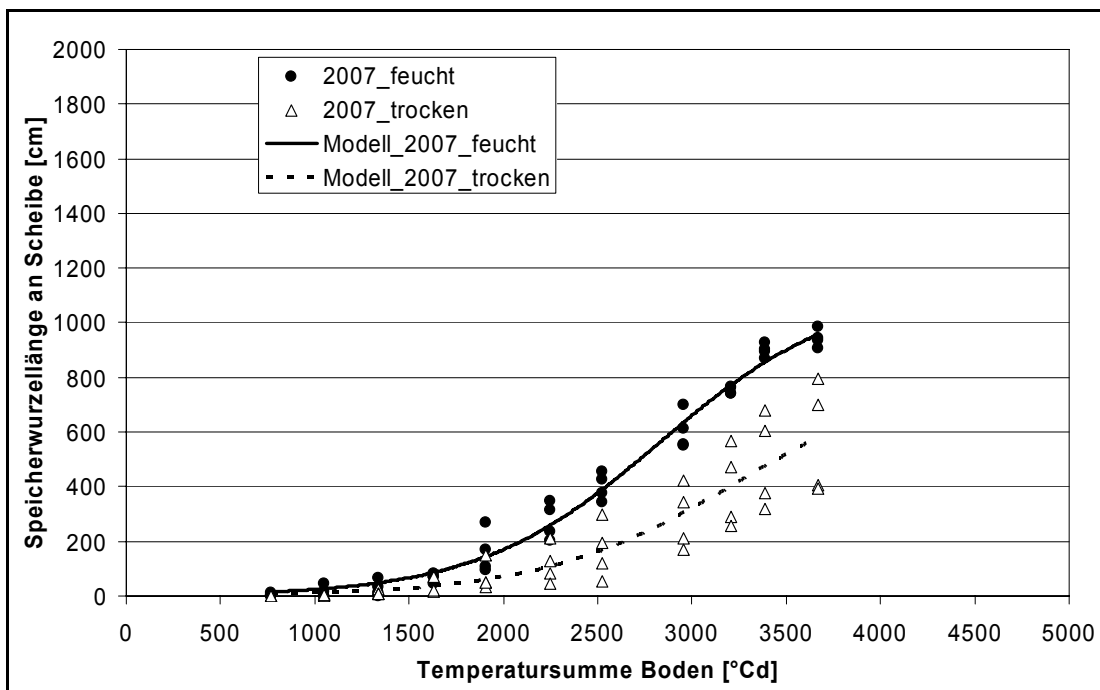


Abbildung 27: Einfluss der Temperatursumme auf die Länge der Speicherwurzeln an der Plexiglasscheibe der Gitterboxen 2007. Parameter und Bestimmtheitsmaß der Funktion siehe Tabelle 19.

Beim Vergleich der Modellparameter wird deutlich, dass vor allem der Parameter p_1 , der den Wendepunkt der Gleichung angibt, in einem ähnlichen Bereich liegt (Tabelle 19). Dieser zeigt, dass die Wachstumsgeschwindigkeit der Speicherwurzeln ab einer Temperatursumme von ca. 3000 °Cd abnimmt.

Tabelle 19: Modellparameter und Bestimmtheitsmaße der Wachstumskurven der Speicherwurzellänge entlang der Plexiglasscheibe ($y = p_0 / (1 + e^{(-(x-p_1)/p_2)})$).

Jahr	Variante	p0		p1		p2		R ²
2005	feucht	1716,2	***	3045,1	***	521,0	***	0,96
2006	feucht	791,6	***	2831,3	***	560,3	***	0,94
	trocken	518,0	***	3150,6	***	461,6	***	0,92
2007	feucht	1122,5	***	2827,8	***	481,1	***	0,98
	trocken	846,1	*	3261,1	***	523,2	*	0,82

n.s.: nicht signifikant, ~: $p \leq 0,1$, *: $p \leq 0,05$, **: $p \leq 0,01$, ***: $p \leq 0,001$
 y = Gesamtrieblänge, x = Temperatursumme

3.5 Einfluss des Wasserangebotes auf das Rhizomwachstum

3.5.1 Praxisfläche

3.5.1.1 Rhizomfrischmasse

Die beiden Varianten unterscheiden sich hinsichtlich der Rhizomfrischmasse an allen Proberodungsterminen (Tabelle 20). In der bewässerten Variante stieg die Rhizomfrischmasse vom Frühjahr 2005 bis zum Frühjahr 2007 von 141 g auf 692 g je Pflanze an. In der unbewässerten Variante stieg die Frischmasse von 117 g auf 259 g je Pflanze. Innerhalb der Jahre 2005 und 2006 konnten die Pflanzen beider Varianten ihre Masse jeweils signifikant steigern. Vom Herbst 2005 bis zum Frühjahrstermin 2006 kam es zu keiner signifikanten Änderung. Hingegen kam es während des Jahreswechsels 2006 auf 2007 in der bewässerten Variante zu einer signifikanten Zunahme, während in der unbewässerten die Rhizomfrischmasse signifikant zurückging.

Tabelle 20: Rhizomfrischmassen [g/Pflanze] der komplett ausgegrabenen Pflanzen zu verschiedenen Terminen. (n=8 Pflanzen je Variante).

Variante	2005		2006		2007	HSD (5%)
	Frühjahr	Herbst	Frühjahr	Herbst	Frühjahr	
bewässert	141 d	381 c	375 c	475 b	692 a	76
unbewässert	117 c	228 b	258 b	326 a	259 b	48
Signifikanz	**	***	**	**	***	

Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben innerhalb der gleichen Zeile unterscheiden sich signifikant nach Tukey-Test ($p \leq 0,05$). Signifikante Unterschiede innerhalb der gleichen Spalte berechnet mit F-Test (n.s.: nicht signifikant, *: $p \leq 0,05$, **: $p \leq 0,01$, ***: $p \leq 0,001$).

3.5.1.2 Rhizomtrockenmasse

Die Rhizomtrockenmasse (Tabelle 21) war in der bewässerten Variante mit Ausnahme des Frühjahrs 2005 signifikant höher als in der unbewässerten Variante. Während des Jahres 2005 kam es in beiden Varianten zu einem signifikanten Anstieg der Trockenmasse von 30 g auf 89 g in der bewässerten Variante und von 30 g auf 59 g in der unbewässerten.

Tabelle 21: Rhizomtrockenmassen [g/Pflanze] der komplett ausgegrabenen Pflanzen zu verschiedenen Terminen. (n=8 Pflanzen je Variante).

Variante	2005		2006		2007	HSD (5%)
	Frühjahr	Herbst	Frühjahr	Herbst	Frühjahr	
bewässert	30 c	89 b	103 b	100 b	164 a	27
unbewässert	30 c	59 b	78 a	79 a	71 ab	15
Signifikanz	n.s.	**	*	**	***	

Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben innerhalb der gleichen Zeile unterscheiden sich signifikant nach Tukey-Test ($p \leq 0,05$). Signifikante Unterschiede innerhalb der gleichen Spalte berechnet mit F-Test (n.s.: nicht signifikant, *: $p \leq 0,05$, **: $p \leq 0,01$, ***: $p \leq 0,001$).

Im Jahr 2006 unterschieden sich die Pflanzen innerhalb der Varianten an den unterschiedlichen Probenahmeterminen nicht. Die Pflanzen in der bewässerten Variante zeigten im Frühjahr 2007 im Vergleich zum Herbst 2006 signifikant höhere

Trockenmassen. In der unbewässerten Variante unterschieden sich die Trockenmassen nicht.

3.5.1.3 Rhizomtrockensubstanz

Die Pflanzen der unbewässerten Variante wiesen an allen Terminen signifikant höhere Trockensubstanzgehalte auf als die Pflanzen der bewässerte Variante (Tabelle 22). Im Frühjahr 2006 und 2007 wurde in beiden Varianten jeweils ein höherer Trockensubstanzgehalt nachgewiesen als im vorangegangenen Herbst. Dies konnte in der unbewässerten Variante in beiden Jahren und in der bewässerten vom Herbst 2005 auf Frühjahr 2006 statistisch abgesichert werden. So stieg der Trockensubstanzgehalt im Winterhalbjahr 2005/2006 von 23,4 % auf 27,4 % bzw. von 25,8 % auf 30,3 % und im Winterhalbjahr 2006/2007 von 21,0 % auf 23,7 % bzw. von 24,4 % auf 27,4 %.

Tabelle 22: Rhizomtrockensubstanz [%] der komplett ausgegrabenen Pflanzen zu verschiedenen Terminen. (n=8 Pflanzen je Variante).

Variante	2005		2006		2007	HSD (5%)
	Frühjahr	Herbst	Frühjahr	Herbst	Frühjahr	
bewässert	21,6 b	23,4 b	27,4 a	21,0 b	23,7 b	3,1
unbewässert	25,4 bc	25,8 bc	30,3 a	24,4 c	27,4 b	2,6
Signifikanz	*	~	**	**	*	

Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben innerhalb der gleichen Zeile unterscheiden sich signifikant nach Tukey-Test ($p \leq 0,05$). Signifikante Unterschiede innerhalb der gleichen Spalte berechnet mit F-Test (n.s.: nicht signifikant, ~: $p \leq 0,1$, *: $p \leq 0,05$, **: $p \leq 0,01$, ***: $p \leq 0,001$).

3.5.2 Gitterboxen

Die trocken kultivierten Pflanzen des Jahres 2006 und 2007 wiesen bei Versuchsende signifikant weniger Cluster auf (Tabelle 23). Auch die Rhizomfrisch- und Trockenmassen waren im Jahr 2006 reduziert, im Vergleich zu den feuchten Varianten der Jahre 2005 und 2006. Bei der Betrachtung aller Versuchsjahre waren die Rhizomfrischmassen nicht signifikant unterschiedlich. Im Jahr 2007 hingegen wurden keine Unterschiede bei den Rhizommerkmalen festgestellt. Beim Trockensubstanzgehalt konnte in allen Jahren kein Unterschied festgestellt werden.

Tabelle 23: Wassermenge [L/Pflanze], Frischmasse [g/Pflanze], Trockensubstanz [%], Trockenmasse [g/Pflanze], des Rhizoms sowie die Anzahl der Cluster [St./Pflanze] (n=3 Pflanzen je Variante).

Jahr	Variante	Wasser- menge	FM Rhizom	TS Rhizom	TM Rhizom	Cluster- anzahl
2005	feucht	453	107,9	31,3	33,9	10
2006	feucht	484	116,8	29,8	34,6	10
	trocken	422	63,5	30,1	19,1	8
2007	feucht	368	126,8	27,7	34,4	10
	trocken	321	126,0	27,5	33,7	8
Sig. F-Test		*	n.s.	n.s.	n.s.	*

Signifikante Unterschiede berechnet für Hauptfaktor „Bewässerung“ F-Test
(n.s.: nicht signifikant, *: $p \leq 0,05$, **: $p \leq 0,01$, ***: $p \leq 0,001$).

3.6 Einfluss des Wasserangebotes auf das Faserwurzelwachstum

3.6.1 Praxisfläche

3.6.1.1 Wurzellängendichte (WLD) der Faserwurzeln

An allen Terminen lag die WLD der unbewässerten Variante niedriger als in der bewässerten. Allerdings konnten signifikante Unterschiede nicht an allen Terminen abgesichert werden (Tabelle 24). Die höchste WLD der Faserwurzeln wurde bei der bewässerten Variante mit $12,7 \text{ mm cm}^{-3}$ Ende Oktober 2006 und bei der unbewässerten mit $8,0 \text{ mm cm}^{-3}$ Ende August 2006 ermittelt. Die Wurzellängendichte der Faserwurzeln zeigte in den Untersuchungsjahren einen unterschiedlichen Verlauf. Während beim Einsatz der Bewässerung im Jahr 2005 die mittlere WLD im Juli mit $2,1 \text{ mm cm}^{-3}$ den höchsten Wert erreichte, stieg sie im Jahr 2006 kontinuierlich von $0,6 \text{ mm cm}^{-3}$ Ende März auf $2,3 \text{ mm cm}^{-3}$ im Oktober an. Bei der unbewässerten Variante wurden die höchsten mittleren WLD in beiden Jahren im August mit $0,8 \text{ mm cm}^{-3}$ bzw. $1,0 \text{ mm cm}^{-3}$ festgestellt. Vergleichbar in dieser Variante in beiden Jahre ist auch der Rückgang der mittleren WLD von August bis Oktober.

Tabelle 24: Wurzellängendichte [mm cm^{-3}] der Faserwurzeln im Jahresverlauf mit und ohne Bewässerung. Mittelwert über den Abstand und die Tiefe ($n=64$ je Variante).

Variante	2005						2006				
	März	Mai	Juni	Juli	August	Oktober	März	Mai	Juli	August	Oktober
bew.	1,2 bcd	0,6 bc	1,0 abc	2,1 a	1,3 abc	1,5 abd	0,6 c	1,1 abc	1,5 ad	2,0 a	2,3 ad
unbew.	0,5 ab	0,4 ab	0,4 a	--	0,8 ab	0,5 ab	0,3 ab	0,9 b	--	1,0 ab	0,5 ab
Sig.	n.s.	~	***		**	***	n.s.	n.s.		***	***

Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben innerhalb der gleichen Zeile unterscheiden sich signifikant nach Nemenyi-Test ($p \leq 0,05$). Signifikante Unterschiede innerhalb der gleichen Spalte berechnet mit U-Test (n.s.: nicht signifikant, ~: $p \leq 0,1$, *: $p \leq 0,05$, **: $p \leq 0,01$, ***: $p \leq 0,001$). --: keine Werte an diesem Termin.

Die Verteilung der Faserwurzeln im Bodenprofil zeigt im Jahresverlauf eine sehr große Dynamik (Anhang Abbildung 24 bis Anhang Abbildung 43). In der Verteilung der Faserwurzeln in der bewässerten Variante im Jahr 2005 fällt auf, dass in den Monaten Juni, Juli und Oktober eine Konzentration der Wurzeln im Bereich 60 cm Abstand zur Reihenmitte und in einer Tiefe von 15-30 cm vorlag. Im Jahr 2006 konnte in den Monaten Mai, Juli und Oktober eine Verdichtung der Faserwurzeln im Bereich 30 cm Abstand und einer Tiefe von 0-15 cm nachgewiesen werden.

Bei der unbewässerten Variante konnten unterhalb einer Tiefe von 30 cm nur noch sehr geringe Faserwurzellängendichten festgehalten werden (Abbildung 28). Im Jahr 2005 konnten die höchsten WLD in einem Abstand von 30 cm gemessen werden. Eine Ausnahme bildet hier der Termin im August, an dem die höchste WLD in einem Abstand von 60 cm und einer Tiefe von 15-30 cm zu erkennen war. Im März 2006 fällt auf, dass im Abstand 15 cm, also in unmittelbarer Nähe zur Pflanze keine, bzw. nur sehr wenige Faserwurzeln vorhanden waren. Im August und im Oktober desselben Jahres lagen in dieser Variante die meisten Faserwurzeln in einer Tiefe von 15-30 cm und einem Abstand von 90 cm vor. In beiden Jahren wurde im August der Bodenhorizont im gesamten Abstand zur Reihenmitte durchwurzelt, allerdings nur bis in eine Tiefe von 30 cm.

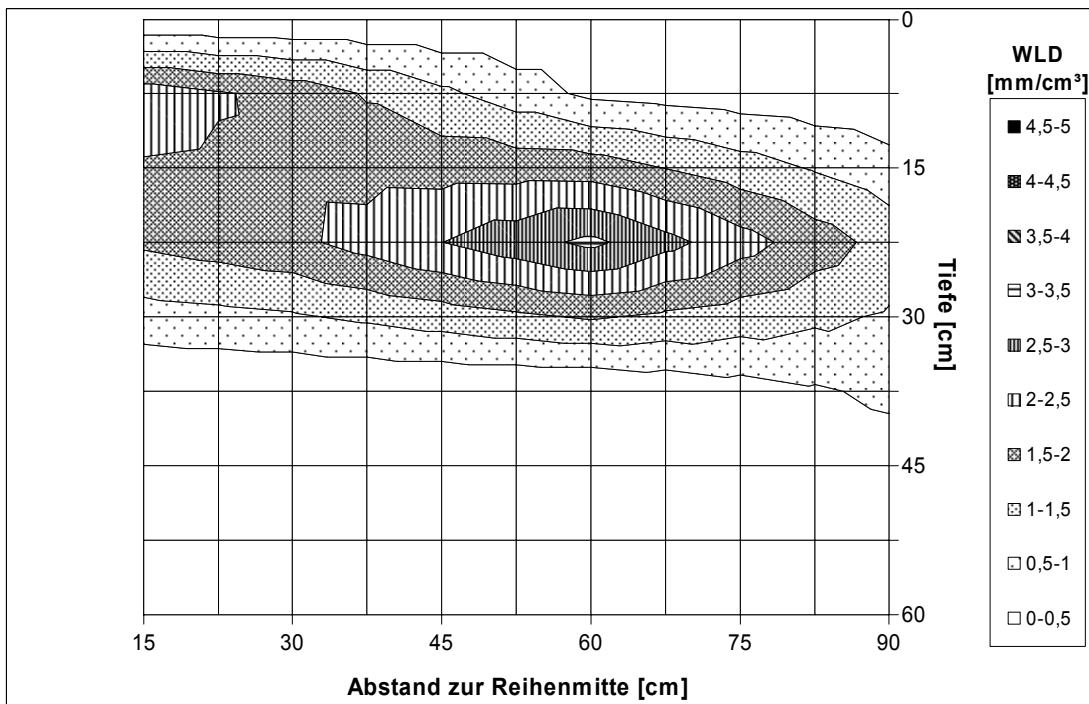


Abbildung 28: Verteilung der mittleren Wurzellängendichte der Faserwurzeln [mm cm^{-3}] im Bodenprofil im August 2005 bei der unbewässerten Variante.

3.6.1.2 Wurzeltrockenmassendichte (WTMD) der Faserwurzeln

Mit Ausnahme der Termine März und Mai beider Jahre konnten signifikante Unterschiede in der Wurzeltrockenmassendichte der Faserwurzeln nachgewiesen werden (Tabelle 25). Lediglich im August 2005 lag die WTMD der unbewässerten Variante mit $1,1 \text{ mg cm}^{-3}$ über dem Wert der bewässerten mit $1,0 \text{ mg cm}^{-3}$.

An allen anderen Terminen lag in den bewässerten Parzellen eine höhere WTMD vor. Vor allem bei den Oktoberterminen beider Jahre lag mit $1,4 \text{ mg cm}^{-3}$ im Vergleich zu $0,3 \text{ mg cm}^{-3}$ bzw. $0,6 \text{ mg cm}^{-3}$ ein sehr großer Unterschied vor. Die größte mittlere Wurzeltrockenmassendichte wurde im Juli 2005 mit $0,15 \text{ mg cm}^{-3}$ festgestellt.

Tabelle 25: Wurzeltrockenmassendichte [mg cm^{-3}] der Faserwurzeln im Jahresverlauf mit und ohne Bewässerung. Mittelwert über den Abstand und die Tiefe (n=64 je Variante).

Variante	2005						2006				
	März	Mai	Juni	Juli	August	Oktober	März	Mai	Juli	August	Oktober
bew.	1,0 a	0,7 a	0,6 a	1,5 a	1,0 a	1,4 a	0,8 a	1,0 a	0,8 a	1,0 a	1,4 a
unbew.	0,6 bc	0,5 abc	0,3 a	--	1,1 abc	0,3 ab	0,4 abc	1,0 c	--	0,7 abc	0,6 abc
Sig.	n.s.	n.s.	***		*	***	n.s.	n.s.		***	**

Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben innerhalb der gleichen Zeile unterscheiden sich signifikant nach Nemenyi-Test ($p \leq 0,05$). Signifikante Unterschiede innerhalb der gleichen Spalte berechnet mit U-Test (n.s.: nicht signifikant, ~: $p \leq 0,1$, *: $p \leq 0,05$, **: $p \leq 0,01$, ***: $p \leq 0,001$). --: keine Werte an diesem Termin.

3.6.1.3 Faserwurzeldurchmesser

Im Jahr 2005 gab es sowohl in der bewässerten als auch in der unbewässerten Variante eine große Schwankung der Werte zwischen den einzelnen Terminen. Der mittlere Durchmesser der Faserwurzeln lag zwischen 0,8 mm und 1,8 mm bzw. zwischen 0,9 mm und 1,7 mm (Tabelle 26).

Tabelle 26: Durchmesser [mm] der Faserwurzeln im Jahresverlauf mit und ohne Bewässerung. Mittelwert über den Abstand und die Tiefe (n=64 je Variante).

Variante	2005						2006					HSD (5%)
	März	Mai	Juni	Juli	August	Oktober	März	Mai	Juli	August	Oktober	
bew.	1,5 b	1,7 a	1,1 c	1,2 c	1,1 c	0,9 d	0,8 d	0,9 d	0,9 d	0,9 d	0,9 d	0,1
unbew.	1,4 b	1,8 a	1,1 c	--	1,1 c	0,8 d	0,8 d	1,0 c	--	0,8 cd	1,0 c	0,2
Sig.	n.s.	n.s.	n.s.		n.s.	n.s.	n.s.	***		n.s.	***	

Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben innerhalb der gleichen Zeile unterscheiden sich signifikant nach Tukey-Test ($p \leq 0,05$). Signifikante Unterschiede innerhalb der gleichen Spalte berechnet mit F-Test (n.s.: nicht signifikant, ~: $p \leq 0,1$, *: $p \leq 0,05$, **: $p \leq 0,01$, ***: $p \leq 0,001$). --: keine Werte an diesem Termin.

Im Jahr 2006 gab es keine so große Spannbreite des Durchmessers. In der bewässerten Variante lagen sie konstant zwischen 0,8 mm und 0,9 mm und in der unbewässerten

Variante zwischen 0,8 mm und 1,0 mm. Signifikante Unterschiede zwischen den Varianten konnten nur im Mai und im Oktober 2006 festgestellt werden, wobei die unbewässerte Variante hier die größeren Durchmesser aufwies.

3.6.1.4 Mittlerer-halber-Wurzelabstand (mhWa) der Faserwurzeln

Der mittlere halbe Wurzelabstand der Faserwurzeln lag zwischen 1,1 cm (unbewässerte Variante August 2006) und 2,9 cm (unbewässerte Variante März 2006) (Tabelle 27). Signifikante Unterschiede zwischen den Varianten konnten nur im August und Oktober 2006 ermittelt werden, wobei im August des Jahres der mhWa in der unbewässerten Variante niedriger war und im Oktober in der bewässerten Variante.

Tabelle 27: Mittlerer halber Wurzelabstand [cm] der Faserwurzeln im Jahresverlauf mit und ohne Bewässerung. Mittelwert über den Abstand und die Tiefe (n=64 je Variante).

Variante	2005						2006				
	März	Mai	Juni	Juli	August	Oktober	März	Mai	Juli	August	Oktober
bew.	2,3 abc	2,8 bc	2,4 bc	1,5 a	1,9 abc	1,7 abd	2,2 c	1,9 bcd	2,0 abd	1,5 ad	1,4 abd
unbew.	2,6 a	2,7 ab	2,7 c	--	1,6 ab	1,9 abd	2,9 bd	1,9 ab	--	1,1 cd	2,5 bd
Sig.	n.s.	n.s.	n.s.		n.s.	n.s.	*	n.s.		**	***

Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben innerhalb der gleichen Zeile unterscheiden sich signifikant nach Nemenyi-Test ($p \leq 0,05$). Signifikante Unterschiede innerhalb der gleichen Spalte berechnet mit U-Test (n.s.: nicht signifikant, ~: $p \leq 0,1$, *: $p \leq 0,05$, **: $p \leq 0,01$, ***: $p \leq 0,001$). --: keine Werte an diesem Termin.

Zu Beginn beider Jahre lag der mhWa bei den Pflanzen in beiden Varianten mit 2,3 cm und 2,6 cm bzw. mit 2,2 cm und 2,9 cm im hohen Bereich. Die niedrigsten Abstände wurden immer im Sommer und Herbst beider Jahre gemessen.

3.6.1.5 Spezifische Wurzellänge (SWL) der Faserwurzeln

Die spezifische Wurzellänge der Faserwurzeln beträgt ein Vielfaches der spezifischen Wurzellänge der Speicherwurzeln. Jeweils im Frühjahr wurden die geringsten SWL festgestellt (Tabelle 28). Die höchste SWL in der bewässerten Variante wurde in 2005 im Juli mit 18 m gTM^{-1} und 2006 im August mit 23 m gTM^{-1} . Dies war zugleich die größte SWL innerhalb der bewässerten Variante. In der unbewässerten Variante wurde

2005 die höchste SWL im Oktober mit 23 m gTM⁻¹, welche ebenfalls die größte SWL innerhalb dieser Variante war gemessen. Im Jahr 2006 wurde die größte SWL im August mit lediglich 14 m gTM⁻¹ festgestellt. Mit Ausnahme des Oktobertermins 2005 war die SWL der bewässerten Pflanzen immer höher als in der unbewässerten. Dies konnte an verschiedenen Terminen abgesichert werden.

Tabelle 28: Spezifische Wurzellänge [m gTM⁻¹] der Faserwurzeln im Jahresverlauf mit und ohne Bewässerung. Mittelwert über den Abstand und die Tiefe (n=64 je Variante).

Variante	2005						2006				
	März	Mai	Juni	Juli	August	Oktober	März	Mai	Juli	August	Oktober
bew.	12 bc	9 b	17 a	18 abc	14 abc	15 abc	9 abc	14 abc	20 a	23 abc	19 ac
unbew.	6 d	9 ad	14 c	--	10 ab	23 be	9 ab	11 ab	--	14 ce	10 be
Sig.	***	n.s.	n.s.		***	**	n.s.	n.s.		***	***

Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben innerhalb der gleichen Zeile unterscheiden sich signifikant nach Nemenyi-Test ($p \leq 0,05$). Signifikante Unterschiede innerhalb der gleichen Spalte berechnet mit U-Test (n.s.: nicht signifikant, ~: $p \leq 0,1$, *: $p \leq 0,05$, **: $p \leq 0,01$, ***: $p \leq 0,001$). --: keine Werte an diesem Termin.

3.6.1.6 Faserwurzeltrockensubstanz (TS)

Der Trockensubstanzgehalt der beiden Varianten unterschied sich ab dem Messtermin August 2005 (Tabelle 14). In der bewässerten Variante lag der niedrigste Trockensubstanzgehalt in beiden Jahren im Juli bzw. im August vor, während in der unbewässerten Variante der niedrigste Gehalt im März bzw. im Mai vorlag. Der höchste Gehalt wurde im Oktober 2005 mit 19,6 % bzw. 24,6 % gemessen, was zugleich der höchste gemessene Trockensubstanzgehalt der Faserwurzeln war.

3.6.1.7 Gesamt-Faserwurzellänge je Pflanze

Die Faserwurzellänge je Einzelpflanze liegt in der bewässerten Variante an allen Messterminen über der Länge der unbewässerten (Abbildung 29). Signifikante Unterschiede konnten in der Praxis jedoch nicht immer nachgewiesen werden. Die Verläufe der Faserwurzellänge unterschieden sich zwischen den beiden Varianten und Jahren. Während es in der bewässerten Variante im Frühjahr 2005 zu einem Rückgang

der Gesamtlänge je Pflanze kam, stieg die Faserwurzellänge im Jahr 2006 vom ersten bis zum letzten Probetermin kontinuierlich an. In der bewässerten Variante stieg die Länge der Faserwurzeln von August bis Oktober in beiden Jahren an, während sie in der unbewässerten in beiden Jahren zurückging. In beiden Varianten nahm die Faserwurzellänge während des Winters 2005/2006 ab. Das absolute Maximum der Faserwurzellänge je Pflanze wurde bei der bewässerten Variante im Oktober 2006 mit 1100 m/Pflanze und bei der unbewässerten Variante im Mai 2006 mit 500 m/Pflanze gemessen. Das absolute Minimum lag in der bewässerten Variante im März 2006 mit 53 m/Pflanze vor. In der unbewässerten Variante wurden im Juni 2005 in einer Wiederholung keine Faserwurzeln festgestellt.

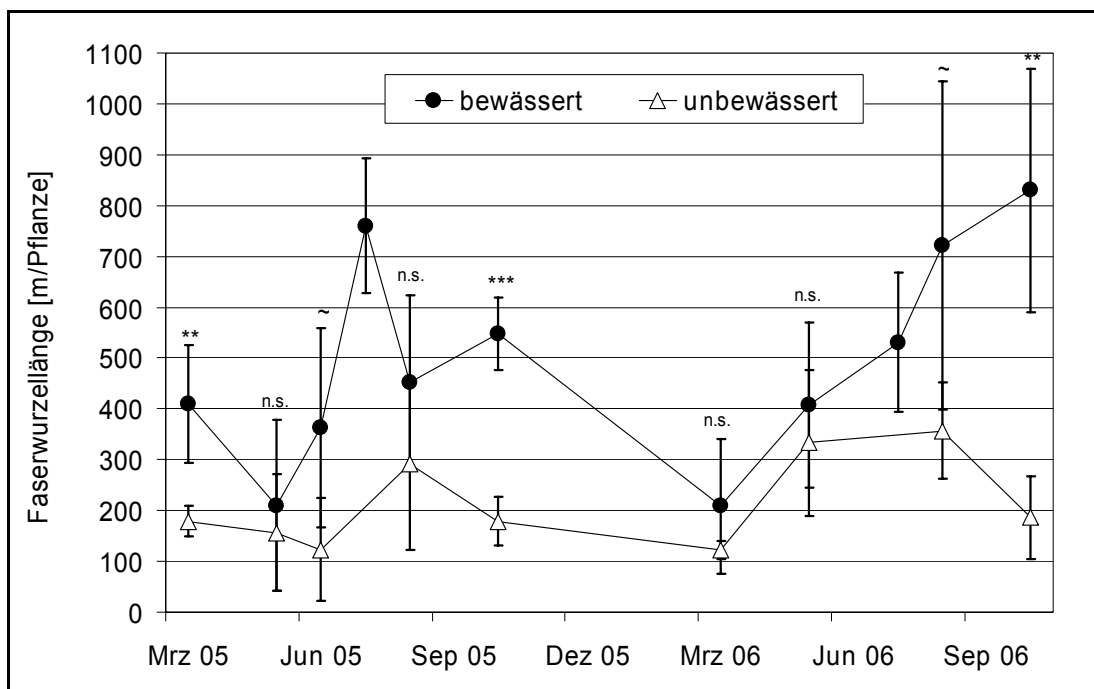


Abbildung 29: Faserwurzellänge [m/Pflanze] bewässerter und unbewässerter Spargelpflanzen. Fehlerbalken kennzeichnen Standardabweichung. Signifikanzgrenzen kennzeichnen Unterschiede zwischen den Varianten. Signifikanz mit F-Test (n.s.: nicht signifikant, ~: $p \leq 0,1$, *: $p \leq 0,05$, **: $p \leq 0,01$, ***: $p \leq 0,001$).

3.6.1.8 Zusammenhang der Faserwurzelmerkmale

Mit Ausnahme des Trockensubstanzgehaltes konnten gute Zusammenhänge zwischen den einzelnen Wurzelmerkmalen festgestellt werden (Tabelle 29). Beide Jahre zeigten einen ähnlichen Verlauf. Vor allem der Zusammenhang zwischen Trockenmasse und

Frischmasse ist sehr groß. Aufgrund dessen ist auch der Zusammenhang zwischen WTMD und WFMD sehr groß.

Tabelle 29: Bestimmtheitsmaße der Faserwurzelmerkmale des Praxisversuches.

		Frishmasse	Trockenmasse	Trockensubstanz	WLD	WFMD
Trockenmasse	2005	0,92				
	2006	0,92				
Trockensubstanz	2005	0,04	0,00			
	2006	0,04	0,00			
WLD	2005	0,74	0,74	0,00		
	2006	0,75	0,70	0,02		
WFMD	2005		0,92	0,03	0,74	
	2006		0,92	0,04	0,75	
WTMD	2005	0,90		0,00	0,73	0,91
	2006	0,92		0,00	0,70	0,92

3.6.2 Gitterboxen

3.6.2.1 Faserwurzelmerkmale

Die trocken kultivierten Pflanzen wiesen bei Versuchsende signifikant weniger Faserwurzeln auf als die der feuchten Variante (Tabelle 30). Dies konnte lediglich auf einem Signifikanzniveau von 10 % abgesichert werden. Der Trockensubstanzgehalt war in der trockenen Variante mit 19,1 % bzw. 21,2 % signifikant höher als in der feuchten Variante mit 17,4 % bzw. 16,5 % bzw. 20,5 %.

Die Faserwurzellänge an der Plexiglasscheibe wurde im Jahr 2005 nur bis Mitte September erfasst, deshalb dient hier der Messwert Mitte September als Vergleichsmaß. Es wird ersichtlich, dass die höchste Wassermenge von 484 L/Pflanze auch die höchste Faserwurzellänge von 6210 cm erbracht hat. Allerdings wiesen die Pflanzen der feuchten Variante im Jahr 2007, die weniger Wasser erhalten hatten als die der trockenen Variante im Jahr 2006, eine größere Faserwurzellänge zu diesem Zeitpunkt auf. Dieser Unterschied lässt sich nur auf die Jahresabhängigkeit (vgl. Abbildung 30)

und die große Streuung der Messwerte zurückführen. Es konnten keine Unterschiede zwischen der feuchten und trockenen Variante hinsichtlich des Merkmals Faserwurzellänge an der Scheibe Mitte September nachgewiesen werden.

Tabelle 30: Wassermenge [L/Pflanze], Frischmasse [g/Pflanze], Trockensubstanz [%], Trockenmasse [g/Pflanze] der Faserwurzeln, sowie die Mitte September gemessene Länge an der Plexiglasscheibe [cm] der Faserwurzeln der Gitterbox-Versuche (n=3 Pflanzen je Variante).

Jahr	Variante	Wasser- menge	FM FaW	TS FaW	TM FaW	FaW Länge Scheibe Mitte Sept.
2005	feucht	453	984	16,5	162	4870
2006	feucht	484	1080	17,4	188	6210
	trocken	422	637	19,1	122	4440
2007	feucht	368	1377	20,5	281	5585
	trocken	321	1076	21,2	226	4316
Sig. -Test		*	~	*	n.s.	n.s.

Signifikante Unterschiede berechnet für Hauptfaktor „Bewässerung“ F-Test (n.s.: nicht signifikant, *: $p \leq 0,05$, **: $p \leq 0,01$, ***: $p \leq 0,001$).

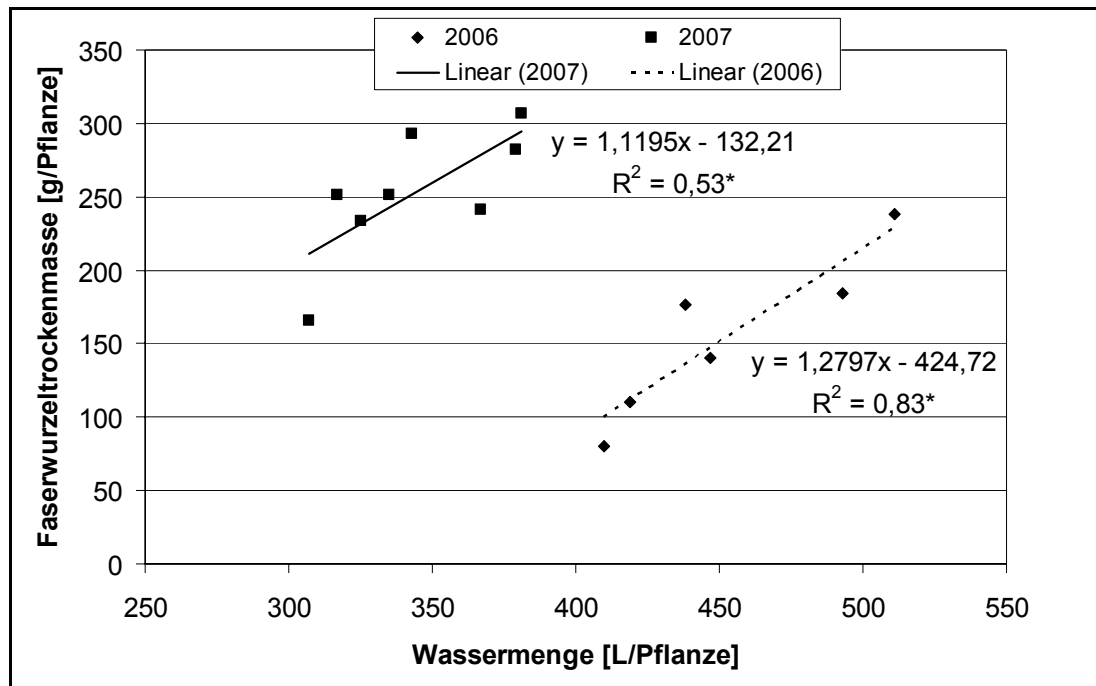


Abbildung 30: Zusammenhang zwischen ausgebrachter Wassermenge und Faserwurzeltrockenmasse im Gitterbox-Versuch (2006: n=6; 2007: n=8).

3.6.2.2 Wachstumsmodell

In den Abbildung 31 bis Abbildung 33 wird der Verlauf des Faserwurzelwachstums entlang der Plexiglasscheibe dargestellt. Dabei ist besonders auffällig, dass das Wachstum der Faserwurzeln im Jahr 2005 und 2006 fast identisch verläuft. Dies wird auch anhand der Parameter der Wachstumsfunktion deutlich (Tabelle 31). So ist vor allem der Parameter p_1 , der Wendepunkt der Funktion, mit 2465 bzw. mit 2456 nahezu identisch. Der Parameter p_0 , die obere Grenze der Funktion, liegt mit 5800 bzw. mit 6500 im selben Bereich. Bei beiden Varianten konnte mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,87 und 0,92 eine sehr gute Anpassung der Funktion an die Messdaten erzielt werden. Bei der trockenen Variante im Jahr 2006 liegt das Bestimmtheitsmaß lediglich bei 0,56. Außerdem streuen die Messwerte sehr stark.

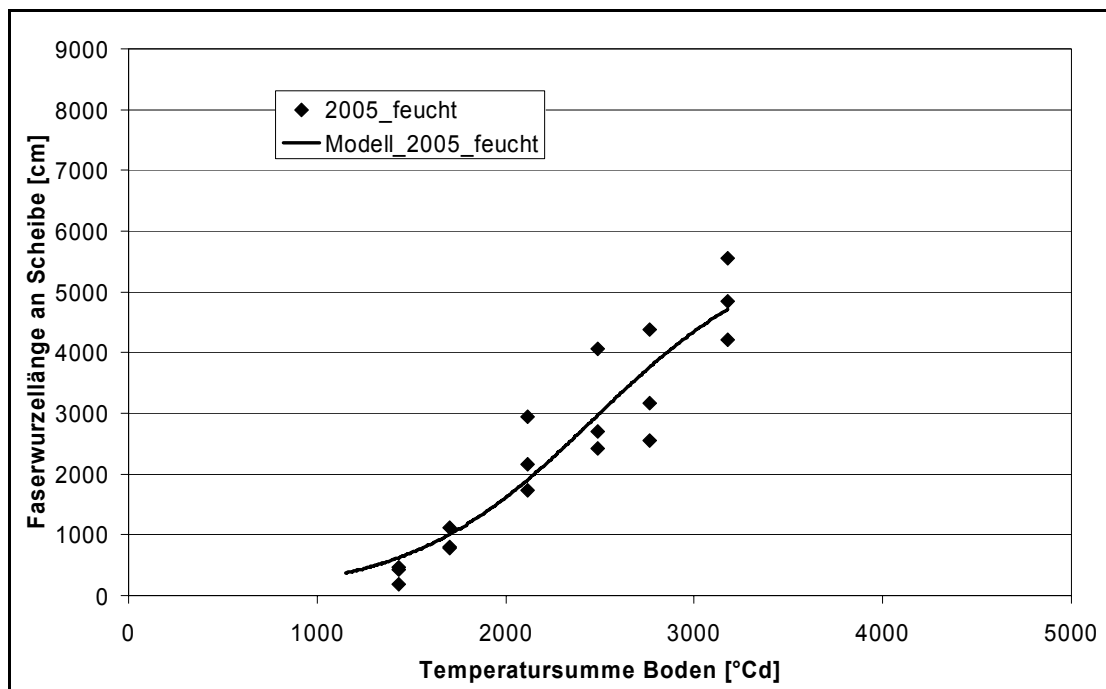


Abbildung 31: Einfluss der Temperatursumme auf die Länge der Faserwurzeln an der Plexiglasscheibe der Gitterboxen 2005. Parameter und Bestimmtheitsmaß der Funktion siehe Tabelle 31.

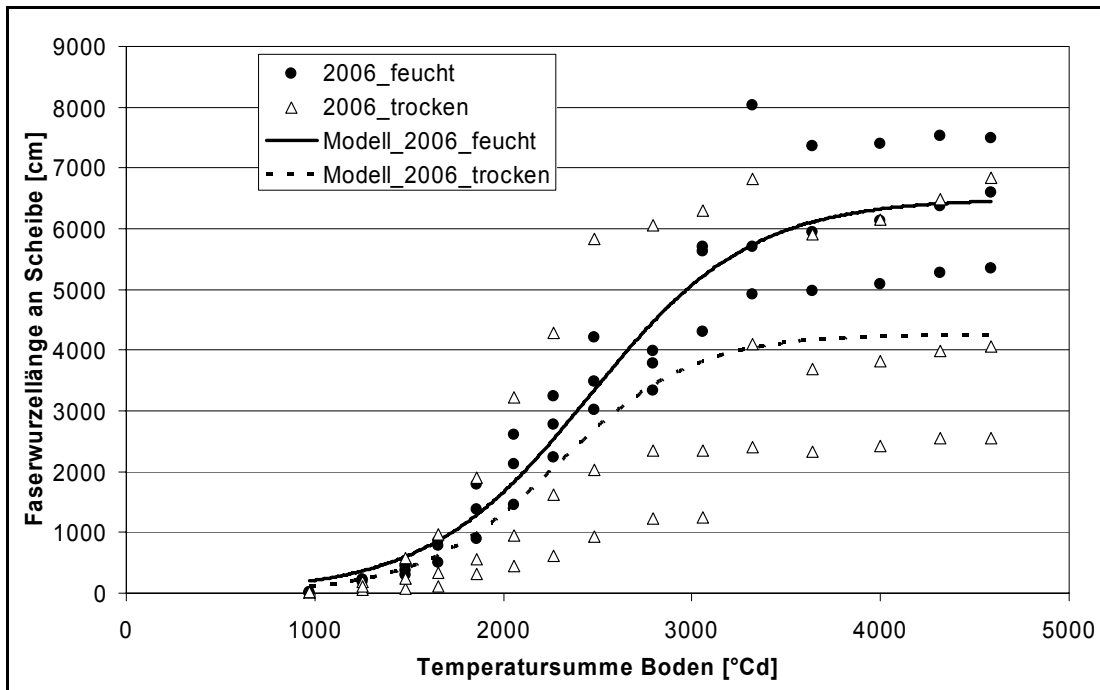


Abbildung 32: Einfluss der Temperatursumme auf die Länge der Faserwurzeln an der Plexiglasscheibe der Gitterboxen 2006. Parameter und Bestimmtheitsmaß der Funktion siehe Tabelle 31.

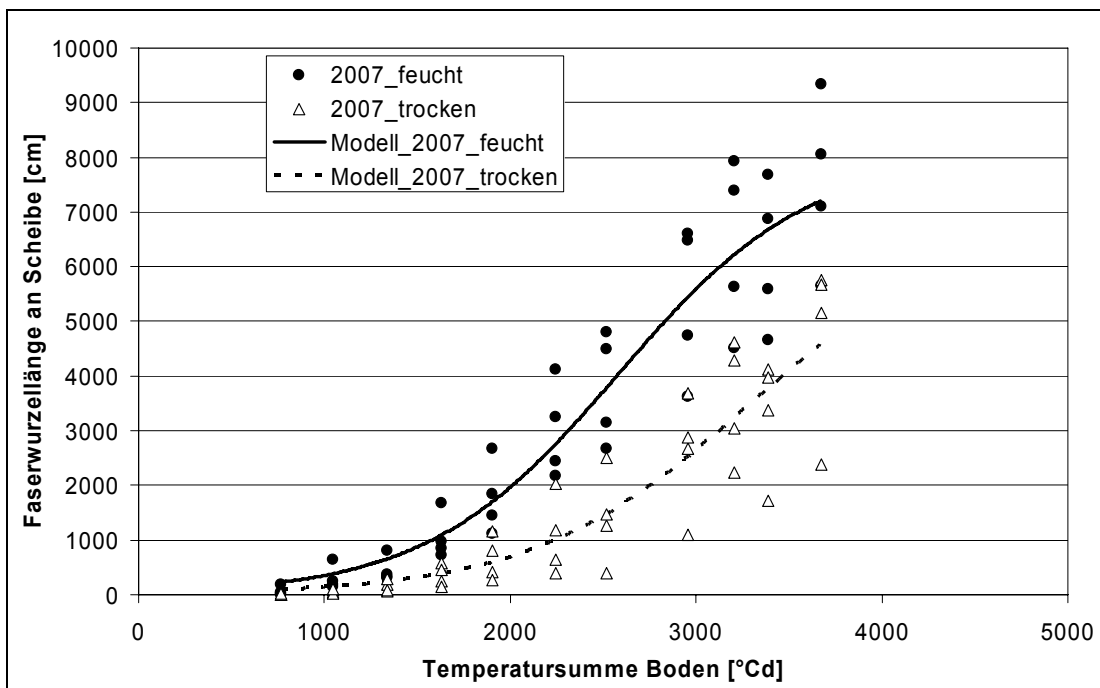


Abbildung 33: Einfluss der Temperatursumme auf die Länge der Faserwurzeln an der Plexiglasscheibe der Gitterboxen 2007. Parameter und Bestimmtheitsmaß der Funktion siehe Tabelle 31.

Im Jahr 2007 wurde in der feuchten Variante, wie in den vorangegangenen Jahren, ein Wendepunkt im Bereich von 2500 °Cd festgestellt (Tabelle 31). In der trockenen Variante wurde dieser Punkt jedoch erst bei 3300 °Cd erreicht. Dies steht im Gegensatz zu dem vorangegangenen Jahr, indem der Wendepunkt schon bei einer Temperatursumme von 2300 °Cd erreicht wurde. Eine Erklärung ist im unterschiedlichen Witterungsverlauf beider Versuchsjahre zu finden (Abbildung 2 bis Abbildung 4).

Tabelle 31: Modellparameter und Bestimmtheitsmaße der Wachstumskurven der Faserwurzellänge entlang der Plexiglasscheibe ($y=p_0/(1+e^{-(x-p_1)/p_2})$).

Jahr Variante	p0	p1	p2	R ²
2005 feucht	5803,7 ***	2465,2 ***	488,5 ***	0,87
2006	6495,9 ***	2456,2 ***	428,4 ***	0,92
	4262,7 ***	2291,6 ***	359,0 ***	0,56
2007	8062,1 ***	2580,4 ***	513,0 ***	0,89
	6891,5 *	3276,0 ***	582,2 *	0,81

n.s.: nicht signifikant, ~: $p \leq 0,1$, *: $p \leq 0,05$, **: $p \leq 0,01$, ***: $p \leq 0,001$
 y = Gesamtrieblänge, x = Temperatursumme

3.7 Lagerungsdichte des Bodens der Praxisversuchsfläche

Vor der Anlage der Spargelfläche wurde der Schlag einheitlich bewirtschaftet. Im Zuge der Vorbereitungen für die Neuanlage der Spargelfläche wurde mittels einer Tiefenlockerung der Boden bis in eine Bodenschicht von 90 cm gelockert. Daher ist davon auszugehen, dass der Boden überall eine ähnliche Lagerungsdichte aufwies. Um beurteilen zu können, welchen Einfluss die Bewässerung auf die Lagerungsdichte während der Standzeit einer Spargelanlage hat, wurde die Lagerungsdichte auf der bewässerten und auf der unbewässerten Teilfläche bestimmt. Innerhalb der unbewässerten Variante unterscheiden sich die Lagerungsdichten der verschiedenen Tiefen nicht (Tabelle 32). Bei der bewässerten Variante unterschied sich die Lagerungsdichte in der Tiefe 15 cm signifikant von den anderen Tiefen innerhalb dieser Variante. Die Lagerungsdichte in 15 cm Tiefe unterscheidet sich zudem signifikant von der Lagerungsdichte gleicher Tiefe der unbewässerten Variante. In der Tiefe 30 cm liegt die Lagerungsdichte der unbewässerten Variante mit 1,57 g cm⁻³ signifikant unter der

Lagerungsdichte der bewässerten Variante mit $1,71 \text{ g cm}^{-3}$. Sehr deutlich sind die sehr hohen Lagerungsdichten in der bewässerten Variante in den Tiefen 30 cm und 45 cm ersichtlich. Diese beiden Bodentiefen entsprechen der Bodenschicht, in der die Tropfrohre verlegt sind, bzw. der Bodenschicht darunter.

Tabelle 32: Lagerungsdichten [g cm^{-3}] der beiden Varianten in verschiedenen Tiefen (n=8).

Tiefe [cm]	bewässert	unbewässert	Sig.
15	1,45 b	1,56	**
30	1,71 a	1,57	**
45	1,70 a	1,60	*
60	1,61 a	1,57	n.s.
HSD (5%)	0,11	n.s.	

Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben innerhalb der gleichen Spalte unterscheiden sich signifikant nach Tukey-Test ($p \leq 0,05$). Signifikante Unterschiede innerhalb der gleichen Zeile berechnet mit F-Test (n.s.: nicht signifikant, *: $p \leq 0,05$ **: $p \leq 0,01$).

Aus diesen Ergebnissen lässt sich ableiten, dass die Lagerungsdichte aufgrund der höheren Bodenfeuchte, in der bewässerten Variante signifikant erhöht wird. Da ein feuchterer Boden verdichtungsanfälliger ist als ein trockener Boden, wird der feuchte Boden bei den häufigen Überfahrungen während der Vegetationsperiode wesentlich stärker verdichtet als der nicht bewässerte Boden.

3.8 Einfluss des Wasserangebotes auf die RKH-Konzentration

3.8.1 Praxisfläche

Die Konzentration an RKH lag in der unbewässerten Variante an jedem Messtermin über der Konzentration in der bewässerten Variante (Abbildung 34). Es konnte ein signifikanter Einfluss der Bewässerung nachgewiesen werden. Der mittlere Brix-Wert der Wurzeln in der bewässerten Variante lag bei $14,9^\circ\text{Brix}$ und in der unbewässerten Variante bei $17,9^\circ\text{Brix}$. Die jeweils höchsten Konzentrationen lagen Ende Oktober/Anfang November vor. Im Jahr 2005 lagen diese Werte bei 25°Brix in der bewässerten und 27°Brix in der unbewässerten Variante, im Jahr 2006 bei 20°Brix bzw. 24°Brix und im Jahr 2007 bei $24,5^\circ\text{Brix}$ bzw. $25,0^\circ\text{Brix}$. Die jeweils niedrigsten

Werte lagen immer zum Zeitpunkt der Entfaltung der ersten Phyllokladien vor. Im Jahr 2005 sanken die Werte auf 8,5 °Brix bzw. 9,5 °Brix, im Jahr 2006 auf 5,5 °Brix bzw. 7,5 °Brix und im Jahr 2007 auf 10,5 °Brix bzw. 11,5 °Brix. Der erste Wert gilt für die bewässerten Pflanzen der zweite für die unbewässerten. Nach dem Entfalten der Phyllokladien steigt die Konzentration der RKH bis Anfang November wieder schnell an. Aufgrund der großen Streuung der Messwerte lassen sich nicht an allen Terminen Unterschiede absichern (Werte nicht dargestellt). In Abbildung 35 wird der Zusammenhang von Brix-Werten und dem Trockensubstanzgehalt der Speicherwurzeln ersichtlich. Mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,81 wird die große Abhängigkeit dieser beiden Faktoren voneinander deutlich.

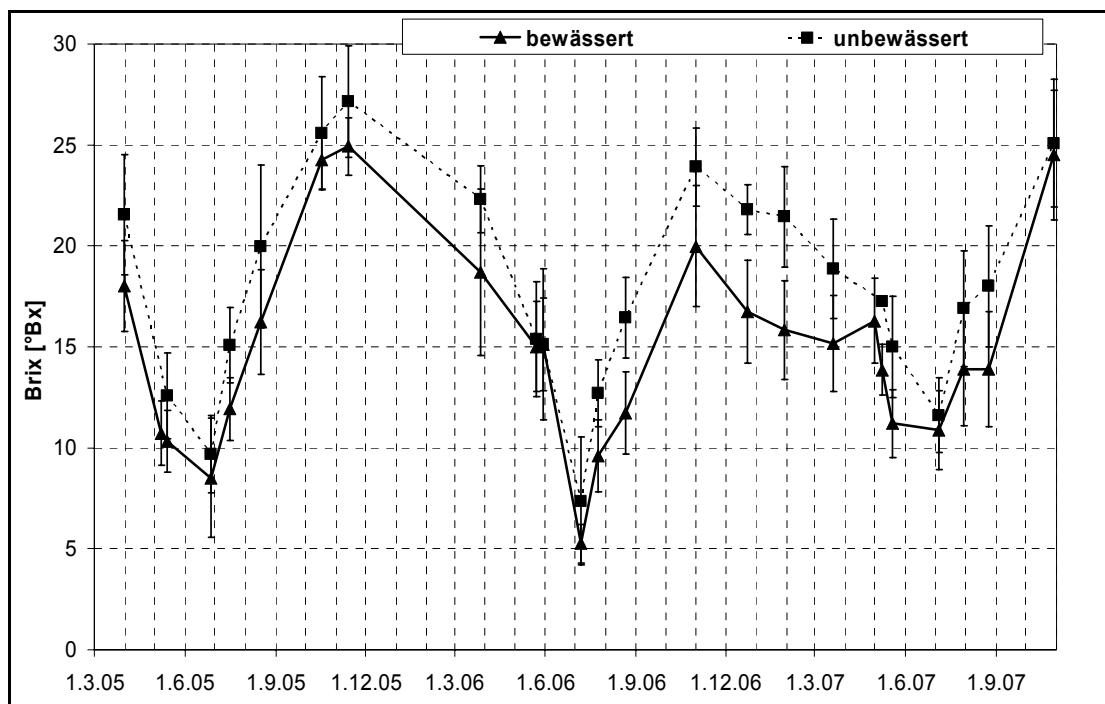


Abbildung 34: Gehalt an wasserlöslichen RKH im Jahresverlauf der bewässerten und unbewässerten Variante des Praxisversuchs. Je Messtermin und je Variante $n = 20$. Fehlerbalken symbolisieren Standardabweichung.

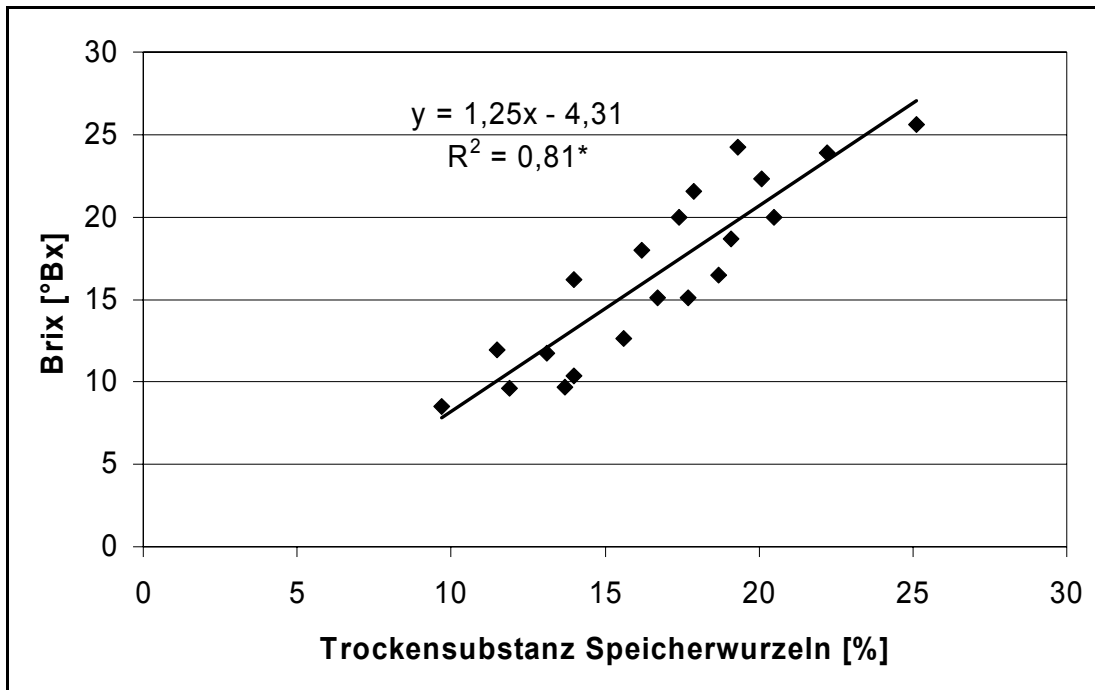


Abbildung 35: Zusammenhang zwischen Brix-Wert und dem Trockensubstanzgehalt der Speicherwurzeln (n=20).

3.8.2 Gitterboxen

Bei den Gitterbox-Versuchen konnte kein Einfluss der Bewässerung auf den RKH-Gehalt festgestellt werden (Tabelle 33). Tendenziell bedeutet aber auch bei den Gitterboxen ein höherer Trockensubstanzgehalt der Speicherwurzeln einen höheren RKH-Gehalt. Vergleicht man die Ergebnisse mit den Ergebnissen aus dem Praxisversuch, kann man daraus folgern, dass die einjährigen Pflanzen der Gitterbox-Versuche sich noch nicht so stark an die Trockenbedingungen angepasst hatten. Somit würden die Unterschiede erst nach mehrjähriger Standzeit auftreten.

Tabelle 33: Wassermenge [l/Pflanze], Brix-Werte [°Bx], Trockensubstanzgehalte [%] der Speicherwurzeln und Gesamtmenge an RKH [g/Pflanze] aus Versuchen in Gitterboxen (n=3 (2005 und 2006) bzw. n=4 (2007); Brix-Werte: n=20).

Jahr	Variante	Wasser- menge	Brix- Wert	TS SpW	Gesamt- menge an RKH
2005	feucht	453	29,9	33,3	507
2006	feucht	484	27,4	28,3	476
	trocken	422	27,7	29,2	276
2007	feucht	368	31,3	31,1	660
	trocken	321	29,7	31,5	488
Sig. -Test		*	n.s.	n.s.	***

Signifikante Unterschiede berechnet für Hauptfaktor „Bewässerung“ F-Test
(n.s.: nicht signifikant, *: $p \leq 0,05$, **: $p \leq 0,01$, ***: $p \leq 0,001$).

3.9 Einfluss der Bewässerung auf den Gesamtgehalt an wasserlöslichen Reservekohlenhydraten

3.9.1 Praxisfläche

Die RKH-Gesamtmenge in den Wurzeln lag zu den gemessenen Zeitpunkten in der bewässerten Variante immer über den Gesamtmengen in der unbewässerten Variante (Tabelle 34). Die größten Unterschiede zwischen den beiden Varianten wurden im Herbst beider Jahre mit 135 g/Pflanze im Jahr 2005 und mit 162 g/Pflanze im Jahr 2006 ermittelt.

Im Frühjahr, also kurz vor dem Start des Triebwachstums, waren die Unterschiede nur noch sehr gering. Im Frühjahr 2005 betrug der Unterschied 69 g, im darauf folgenden Frühjahr 27 g und im Frühjahr 2007 44 g. Die unbewässerten Pflanzen wiesen im Frühjahr 2005 62 % der Menge an RKH der bewässerten Pflanzen, im Frühjahr 2006 94 % und im Frühjahr 2007 90 % auf. In den Frühjahren 2006 und 2007 konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Varianten festgestellt werden, da die Unterschiede zu gering waren. Allerdings lag zu diesen Zeitpunkten die RKH-Menge in den Wurzeln der bewässerten Pflanzen auch über den Mengen in den Wurzeln der

unbewässerten Pflanzen. Im Herbst der vorangegangenen Jahre lag allerdings noch ein signifikanter Unterschied vor.

Tabelle 34: Berechnete Gesamtgehalte an Reservekohlenhydraten [g/Pflanze] im Praxisversuch (n=4 je Variante)

Variante	2005		2006		2007	HSD (5%)
	Frühjahr	Herbst	Frühjahr	Herbst	Frühjahr	
bewässert	181 c	525 ab	440 b	607 a	422 b	152
unbewässert	112 b	390 a	413 a	445 a	378 a	94
Signifikanz	***	*	n.s.	*	n.s.	

Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben innerhalb der gleichen Zeile unterscheiden sich signifikant nach Tukey-Test ($p \leq 0,05$). Signifikante Unterschiede innerhalb der gleichen Spalte berechnet mit F-Test (n.s.: nicht signifikant, *: $p \leq 0,05$, **: $p \leq 0,01$, ***: $p \leq 0,001$).

3.9.2 Gitterboxen

Tabelle 33 zeigt die signifikanten Unterschiede im Gesamtgehalt an RKH zwischen den feucht und trocken kultivierten Pflanzen. Es wird ersichtlich, dass trotz eines vergleichbaren Brix-Wertes die Gesamtmenge an RKH in den feuchten Varianten fast die doppelte bzw. die 1,5fache Menge aufweist als die trockenen Varianten. Dieser Unterschied hängt mit der bei den bewässerten Pflanzen signifikant höheren Speicherwurzeltrockenmasse zusammen (Tabelle 18), die in die Berechnung der RKH-Gesamtmenge mit eingeht.

3.10 Verbrauch von RKH für Aufwuchs und Ertrag

Während der Ernteperiode und während der Ausbildung der ersten Triebe blieb die unterirdische Frischmasse in beiden Versuchsjahren weitestgehend unverändert. Als Beispiel sind in Tabelle 35 die Frischmassen der Speicherwurzeln aufgeführt. Die Trockenmasse der unterirdischen Pflanzenteile ging allerdings in beiden Jahren vom Vorerntetermin bis zum Ernteende sehr stark zurück. Im Jahr 2005 sank die Trockenmasse von 501 g/Pflanze auf 388 g/Pflanze bis zu Ernteende und dann auf 276 g/Pflanze kurz vor der Ausbildung der ersten Phyllokladien. Damit verlor die Pflanze im Jahr 2005 ca. 45 % ihrer unterirdischen Trockenmasse. Im Jahr 2006 ging

die Trockenmasse der Wurzeln und des Rhizoms ebenfalls um ca. 40 % zurück. Der Rückgang der Trockenmasse wird in beiden Jahren zwischen 80 % und 90 % durch den Verlust an Trockenmasse in den Speicherwurzeln hervorgerufen.

Tabelle 35: Veränderung der Frisch- und Trockenmasse der Speicherwurzeln [g/Pflanze], daraus berechnetem Verlust an Trockenmasse und daraus aufgebauter Aufwuchstrockenmasse [g/Pflanze], sowie daraus berechneter Effektivität [%] (n=10 je Termin).

Variante	FM SpW	TM SpW	Verlust TM SpW	TM Unterirdisch	Verlust TM Unterirdisch	TM Aufwuchs	Effektivität	Brix-Wert
vor der Ernte 2006	1318	379		501				27,0
Ernteende 2006	1248	290	89	388	113	24	21	20,7
Aufwuchs 2006	1230	179	200	276	225	107	47	9,8
2006 HSD 5%	n.s.	61		86		17		1,3
vor der Ernte 2007	3196	999		1321				30,5
Ernteende 2007	3200	781	218	1072	248	89	36	22,2
Aufwuchs 2007	3334	509	490	789	532	327	61	11,1
2007 HSD 5%	n.s.	162		228		40		1,2

Grenzdifferenz berechnet mit Tukey-Test ($p \leq 0,05$), n.s.: nicht signifikant.

Die Differenzen im Trockenmassegehalt konnten nur zum Teil durch die Bildung der Erntesprosse und des Aufwuchses erklärt werden. So wurde 2005 bis zum Ernteende eine Triebtrockenmasse von 24 g/Pflanze gebildet. In den unterirdischen Organen ging die TM allerdings um 113 g/Pflanze zurück. Das entspricht nur einer Wiederfindungsrate von 21 %. Bis zur Bildung des ersten Aufwuchses konnte dann ca. 50 % der Differenz der TM in den unterirdischen Pflanzenteilen in den Trieben gefunden werden. 2006 lag die Umsetzung bis zum Ernteende bei 36 % und bis zur Entfaltung der ersten Phyllokladien bei 61 %. Der Brix-Wert geht ebenfalls von Termin zu Termin deutlich zurück.

4 Diskussion

4.1 Einfluss der Bewässerung auf Triebwachstum

In den Praxisversuchsflächen zeigte die Bewässerung einen sehr deutlichen Einfluss auf die Triebmerkmale. So bildeten die bewässerten Pflanzen signifikant mehr Triebe als die unbewässerten. Ähnliche Ergebnisse ergaben Untersuchungen von WILCOX (1985), worin die Triebanzahl mit sinkender Bodenfeuchte ebenfalls zurückging. Auch WILCOX-LEE (1987) ermittelte einen Einfluss auf die Triebanzahl bei sinkender Bodenfeuchte. Diese Versuche von WILCOX (1985) und WILCOX-LEE (1987) wurden im Gegensatz zu den Versuchen in der vorliegenden Arbeit mit Spargelsämlingen durchgeführt. Die jungen Pflanzen zeigen einen deutlicheren Effekt der Bewässerung auf das Wachstum, als bereits voll etablierte Pflanzen. Verschiedene andere Untersuchungen konnten auch in etablierten Anlagen einen Einfluss der Bewässerung auf die Triebanzahl nachweisen (STERRETT et al. (1989), DROST (1996 und 1999b), HARTMANN (1981)). KRUG (1998) weist darauf hin, dass eine Trockenperiode im August die Triebanzahl signifikant im Vergleich zu einer durchgehenden Bewässerung reduziert. In der Arbeit von BATTILINI (1997) hingegen wiesen die Pflanzen, die nicht bewässert wurden, signifikant mehr Triebe als die bewässerten Pflanzen auf. Dieser Versuch wurde in der Po-Ebene durchgeführt, wo, laut Aussage des Autors, der Grundwasserstand bei zwei Meter liegt. Spargel ist in der Lage den Boden bis in eine solche Tiefe zu durchwurzeln, daher sind die Ergebnisse dieser Untersuchung zu bezweifeln. Beim hier durchgeführten Praxisversuch war der Boden ab einer Tiefe von 60 cm sehr stark mit Steinen durchsetzt. Der Grundwasserstand liegt unterhalb der Durchwurzelungszone. Somit ist ein Einfluss des Grundwassers beim hier vorliegenden Versuch auszuschließen. Bei DROST & WILCOX-LEE (1990) ging mit sinkender Bodenfeuchte die Triebanzahl zurück, es konnte kein Einfluss auf die Triebhöhe festgehalten werden. Dies entspricht den Ergebnissen im vorliegenden Praxisversuch. So wurden in der bewässerten Variante signifikant mehr Triebe je Pflanze gezählt, die maximale Trieblänge unterschied sich nicht. Verschiedene Autoren weisen auf den positiven Effekt der Bewässerung auf den Stangendurchmesser hin (ZIEGLER 2002, HARTMANN 1981, KAUFMANN 1977). Im Praxisversuch wurden in der bewässerten Variante im Hinblick auf die absolute Anzahl mehr dicke Stangen gezählt, der prozentuale Anteil dicker Stangen mit einem Durchmesser größer 10 mm an der

Gesamtanzahl an Stangen, war jedoch in der unbewässerten Variante signifikant höher. HARTMANN (1981) untersuchte den Einfluss einer Zusatzbewässerung auf das Spargelwachstum in einem Feldversuch. In seinen Untersuchungen ermittelte er bei einer Zusatzbewässerung eine Zunahme der Neutriebe. Dieses Ergebnis deckt sich mit den hier vorliegenden Ergebnissen. Im Gegensatz zu diesen Ergebnissen konnten beim vorliegenden Praxisversuch in der bewässerten Variante mehr abgestorbene Triebe gezählt werden. In allen drei Versuchsjahren konnte dieses Ergebnis mit Zählungen signifikant abgesichert werden. Die als abgestorbene Triebe gezählten Stangen sind zu einem sehr großen Teil Neutriebe, die sich nicht voll entwickeln konnten. CRÜGER (2002) gibt an, dass dieses Schadbild aufgrund von Störungen im Wasserhaushalt und damit verbundenem Calciummangel in den Triebspitzen zustande kommt. Die neuen Triebe wurden in der Versuchsanlage erst nach der Bewässerungsperiode gebildet, sodass es auch in der bewässerten Variante zu Wassermangelsymptomen kommen konnte. Da die Bodensaugspannung in allen Versuchsjahren gegen Ende der Bewässerungsmaßnahmen unter den Messbereich der Tensiometer fiel, war in der bewässerten Variante auch mit Wassermangel zu rechnen. Die Bonituren von HARTMANN (1981) fanden im Herbst des Etablierungsjahres statt. In diesem Etablierungsjahr haben die Pflanzen, im Gegensatz zu den späteren Jahren des hier vorliegenden Versuchs, noch kein so gut ausgebildetes Wurzelwerk und können daher den Bodenwasservorrat noch nicht voll ausnutzen. PIEPENBROCK (2002) hingegen konnte auch in den bewässerten Varianten mehr abgestorbene Triebe ermitteln als in der unbewässerten. Bei seinen Versuchen war der Anteil an dicken Stangen in den bewässerten Varianten erhöht, was im Gegensatz zu den hier ermittelten Ergebnissen steht.

Im Gitterbox-Versuch wurden ebenfalls Unterschiede in den Triebmerkmalen ermittelt. Es wurden in der feuchten Variante signifikant mehr Triebe gezählt, die insgesamt eine signifikant größere Gesamtrieblänge erreichten. Der mittlere Triebdurchmesser war nicht unterschiedlich. MAYER & PASCHOLD (2007) konnten in Gefäßversuchen bei gleicher Bewässerungssteuerung wie im vorliegenden Gitterbox-Versuch signifikante Unterschiede in der Gesamtrieblänge ermitteln. Im Gegensatz zu den Gitterbox-Versuchen wurden die Pflanzen bei den genannten Autoren in 15-L-Containern angezogen. Das größere Bodenvolumen der Gitterboxen besitzt mehr

Speichervermögen für Wasser. Die Gefäße mit dem kleineren Volumen trocknen schneller aus. Deshalb ist anzunehmen, dass die Pflanzen öfter ein Trockenstress-Signal aus dem Wurzelraum erhalten. Da bei zunehmendem Trockenstress zuerst das Triebwachstum eingeschränkt wird (KRUG et al. 2002) führt dies in den kleinen Gefäßen bereits zu einer Reduktion der Gesamtrieblängen. In den Gefäßen mit dem größeren Bodenvolumen hingegen wurde der Saugspannungs-Schwellenwert nur ca. zehnmal in der Vegetationsperiode erreicht. Auch BLOOM (2003) stellte bei Gefäßversuchen fest, dass in der feucht kultivierten Variante die größte Gesamtrieblänge erreicht wird. Auch bei ihren Versuchen wurde eine starke Förderung des Triebwachstums durch die Bewässerung ersichtlich.

Hinsichtlich des zeitlichen Verlaufes des herbstlichen Gelbwerdens der Triebe sind keine Untersuchungen aus der Literatur bekannt. Laut KRUG (1998) fördert Trockenheit im Herbst die Abreife des Spargellaubes. In den hier durchgeführten Versuchen konnte jedoch in den Gefäß- und auch in den Praxisversuchen ermittelt werden, dass die bewässerten bzw. die feucht kultivierten Pflanzen im Herbst schneller abreifen, als die unbewässerten bzw. die trocken kultivierten Pflanzen. Da bei den feucht kultivierten Pflanzen der Gefäßversuche im September die Bewässerung eingestellt wurde, und bei den Praxisversuchen die Bodenfeuchte im Herbst ebenfalls zurückging, könnte eine mögliche Erklärung für die schnellere Abreife der gut mit Wasser versorgten Pflanzen eine mögliche Anpassung der trocken kultivierten Pflanzen bzw. der unbewässerten Pflanzen sein. Die Pflanzen die die komplette Vegetationsperiode bereits mit wenig Wasser auskommen mussten, könnten die Trockenheit im Herbst dadurch besser überstehen. Die immer ausreichend mit Wasser versorgten Pflanzen hingegen mussten während der Vegetationsperiode keinen Wassermangel überdauern, sodass durch die auftretende Trockenheit im Herbst für die Pflanzen die Induktion zur Abreife war. Diese mögliche Erklärung stünde in Übereinstimmung mit den Versuchen von KRUG (1998). Neben dieser möglichen osmotischen Anpassung der Pflanzen an die Trockenheit spielt der phytosanitäre Aspekt im Praxisversuch eine Rolle. Die unbewässerten Pflanzen wiesen weniger Triebe auf als die bewässerten. Das dichte Laub der bewässerten Pflanzen kann auch mit besten technischen Mitteln nicht vollständig mit den Pflanzenschutzmitteln durchdrungen werden. Daher können sich Pilzkrankheiten im Innern der Laubwand stetig weiterentwickeln und ausbreiten. Es bildet sich dadurch ein

andauernder Infektionsdruck vor allem mit *Stemphylium* und *Botrytis*. Bei den unbewässerten Pflanzen dagegen war die Laubwand nicht so dicht und die Pflanzenschutzmittel konnten auch die inneren Treibteile erreichen und somit die Pilzkrankheiten optimal bekämpfen.

4.1.1 Zeitlicher Verlauf des Triebwachstums in den Gitterboxen

Modelle zum Wachstumsverlauf von Spargel sind bislang nur zur Ertragsprognose (LAMPERT et al. 1980, LIEBIG & WIEBE 1982, VELTEN et al. 2004) und zum Einfluss der Temperatur auf das Triebwachstum (WILSON et al. 1999b, YEN 1993) erarbeitet worden. Hinsichtlich des Triebwachstums während der Vegetationsperiode zwischen unterschiedlich bewässerten Spargelpflanzen sind bislang keine Ergebnisse veröffentlicht. Das Triebwachstum im Gitterbox-Versuch verlief in allen drei Versuchsjahren ähnlich. Zunächst erschien ein Trieb der sich voll entwickelte. Nach einer Temperatursumme von ca. 1250 °Cd erschienen neue Triebe und die Gesamtrieblänge nahm exponentiell bis zu einer Temperatursumme von 2100 °Cd und 2900 °Cd zu. Danach nahm das Triebwachstum wieder ab und wurde ab einer Temperatursumme von ca. 3500 °Cd eingestellt. Diese Temperatursumme war in allen Versuchsjahren Mitte September erreicht. Diesen Verlauf des Triebwachstums stellten auch EHLER & STÜTZEL (2005) fest. Ob das Einstellen des Triebwachstums nach dem Erreichen der Temperatursumme durch eine Abnahme der Tagesmitteltemperaturen oder durch Erreichen der kritischen Temperatursumme induziert wurde, konnte nicht aufgeklärt werden. Allerdings wurde beim Vergleich der Wachstumsfunktionen deutlich, dass das Triebwachstum durch Wassermangel gehemmt wird. Dies wurde nicht auf ein reduziertes Längenwachstum der vorhandenen Triebe sondern auf eine stark reduzierte Triebanzahl zurückgeführt. Diese Ergebnisse wurden auch im Praxisversuch bestätigt.

4.2 Einfluss der Bewässerung auf den Ertrag

Die Ertragserfassung auf der Praxisversuchsfläche konnte aus arbeitswirtschaftlichen Gründen nicht in Wiederholungen erfolgen. Daher wurden die Ertragszahlen statistisch nicht verrechnet. Dennoch werden die Rotherträge mit den in der Literatur beschriebenen Erträgen verglichen. HANNA & DONEEN (1958) erzielten bei Grünspargel eine Ertragserhöhung um 22 %, wenn sie ab einer nFK von 50% bewässerten. Dieser höhere Ertrag wurde durch weniger, aber dafür im Mittel schwerere Stangen erzielt.

Vergleichbare Ergebnisse erzielten DROST & WILCOX-LEE (1997 b) in Gefäßversuchen. Ebenso wurde der Ertrag bei den Untersuchungen von CANNELL & TAKATORI (1970), ROTH & GARDNER (1989 und 1990), STERRETT et al. (1990), BATTILINI (1997), DROST (1999 b) sowie von PASCHOLD et al. (2007) reduziert, wenn Wassermangel während der vorangegangenen Vegetationsperiode vorlag. Somit wäre das Ertragspotential der bewässerten Praxis-Versuchsfläche höher, als es das erreichte Ertragsniveau erscheinen lässt. Da die Ernteperiode in beiden Versuchsjahren jedoch relativ kurz war, konnte die bewässerte Parzelle ihre Ertragspotenz nicht voll ausschöpfen, da die Unterschiede in der Ertragspotenz mit zunehmender Erntedauer zunehmen. So stellte SANDERS (1985) fest, dass mit zunehmender Beerntung einer Anlage die RKH-Reserven sinken. Wenn die bewässerte Anlage mehr Reserven hat, wäre es möglich diese länger zu beernten und damit einen höheren Ertrag zu erzielen.

Wenn Wassermangel während der Ernte vorliegt, geht vor allem der Stangendurchmesser zurück (HARTMANN 1998). Dies war im Praxisversuch jedoch nicht von Bedeutung, da die Spargelreihen mit schwarz-weißer Folie bedeckt waren, die die Verdunstung während der Ernteperiode wesentlich reduziert (ZIEGLER 2002).

Aus verschiedenen Arbeiten ist bekannt, dass die Anzahl an Stangen im Herbst mit dem Ertrag im Folgejahr positiv korreliert (MOON 1976, ELLISON & SCHEER 1959, ELLISON et al. 1959 und 1960). STERRETT et al. (1990) berichten von einer Zunahme der Triebe durch Bewässerung im Pflanzjahr und im ersten Erntejahr von höheren Erträgen. Durch eine höhere Anzahl an Stangen steigt zwar der Ertrag, jedoch steigen mit zunehmendem Anteil an dünnen Stangen die Lohnkosten und der Markterlös der dünnen Stangen ist um ein Vielfaches geringer als der Markterlös der dicken Stangen (KOCH 2007). Laut NICHOLS & WOOLLEY (1985) hängt die Stangenstärke der geernteten Stangen von der Stangenstärke des vorjährigen Laubes zusammen. Somit wäre zu erwarten gewesen, dass in der bewässerten Variante der Ertrag wesentlich höher liegt als in der unbewässerten. Anhand der Herbstbonituren wurde auf der Versuchsfläche eine signifikante Erhöhung der Triebanzahl nachgewiesen. Auch anhand dieser Daten wäre zu erwarten gewesen, dass der Ertrag in der bewässerten Variante in beiden Jahren wesentlich höher ist als in der unbewässerten Variante.

CLINE (1969) fand keine Auswirkung der Bewässerung auf den Ertrag. Auch PASCHOLD & MAYER (2006) erzielten bei Gefäßversuchen im Lysimeter den höchsten Ertrag, wenn

der Bodenwassergehalt zwischen 40 % und 70 % der nWK gehalten wurde. Eine mögliche Erklärung für einen Ertragsrückgang bei hohen Bewässerungsgaben könnte ein verstärkter Befall mit Fusariosen sein, die vorrangig bei anaeroben Bedingungen die Spargelpflanzen befallen können (ZIEGLER 2002). KUNZELMANN (1998) konnte in Praxisuntersuchungen keinen Einfluss der Bewässerungstechnik auf den Ertrag feststellen. Er führt dies auf die große Streuung innerhalb der einzelnen Varianten zurück. Das Wasserangebot wurde in seinen Untersuchungen jedoch weitgehend gleich gehalten.

4.3 Einfluss der Bewässerung auf das Speicherwurzelwachstum

Die aus der Literatur bekannten Effekte von Düngemaßnahmen auf das Wurzelwachstum bei Mais (ANDERSON 1988) oder Getreide (MAX 2004) dürften beim Speicherwurzelwachstum nicht von Bedeutung sein, da die Speicherwurzeln von Spargel im Gegensatz zu den Wurzeln von Mais und Getreide nur in einem geringen Maße und nur kurze Zeit in der Lage sind Nährstoffe aufzunehmen (KRUG et al. 2002).

Die Ausbildung von Speicherorganen ist bei vielen ausdauernden Pflanzen bekannt. Auch die Metamorphose von Wurzeln zur Speicherung von Reservestoffen ist weit verbreitet. Allerdings gibt es einige Untersuchungen zum Einfluss einer differenzierten Bewässerung auf das Wachstum dieser Speicherorgane, da diese in den meisten Fällen das Ernteprodukt dieser Pflanzen ist. Beim Spargel ist dies nicht der Fall. Die Speicherwurzeln dienen ausschließlich der Speicherung von Reservekohlenhydraten und finden, abgesehen von medizinischen Zwecken, keine Verwendung in der menschlichen Ernährung.

Wissenschaftlich fundierte Untersuchungen zur Ausbreitung der Speicherwurzeln von Spargel im Boden gibt es nur sehr wenige. WEAVER & BRUNER (1927) beschreiben die Ausbreitung von Wurzeln unter Anbaubedingungen in den USA. Jungpflanzen sollen nach seinen Aussagen am Ende der Vegetationsperiode bis zu einem Meter Tiefe erschließen können. Allerdings gehen die Autoren von einem senkrechten Wachstum nach unten aus. Eine Speicherwurzel soll eine Tiefe von drei Metern erreicht haben, wobei die meisten Wurzeln oberhalb einer Tiefe von einem Meter endeten. Auch im Praxisversuch befanden sich die meisten Speicherwurzeln oberhalb der Tiefe von einem Meter. Die gewählte Entnahmetiefe von maximal 60 cm begründete sich aus

Vorversuchen, in denen unterhalb von 60 cm keine Speicherwurzeln mehr gefunden wurden. Beim Ausgraben ganzer Pflanzen konnte festgestellt werden, dass ganz vereinzelt Speicherwurzeln in eine Tiefe größer 60 cm wuchsen. Diese einzelnen Wurzeln können bei der Betrachtung der Ergebnisse jedoch vernachlässigt werden. SCOTT (1954) fand unterhalb von 60 cm Bodentiefe nur noch 10 % der gesamten Speicherwurzelmasse. Die meisten bisherigen Untersuchungen befassten sich nur mit verschiedenen Auswirkungen auf das Speicherwurzelgewicht, da dieses als Maß für den Reservestoffpool steht. Je größer die Masse, desto größer ist der potentielle Pool aus dem die Pflanze ihre Reservestoffe beziehen kann. Auch im vorliegenden Praxisversuch wurde durch die Bewässerung die Speicherwurzelfrisch- und Trockenmasse signifikant erhöht (Tabelle 16 und Tabelle 17). Auch im Gitterboxen-Versuch war in der feuchten Variante die Speicherwurzelfrisch- und -trockenmasse signifikant höher (Tabelle 18). DROST (2007) berichtet von einer Speicherwurzelfrischmasse von 69 t/ha bei einer Grünspargelfläche, die über eine Tropfbewässerung mit Zusatzwasser versorgt wird. Werden im Praxisversuch die erfassten Wurzelmassen mit einer Bestandesdichte von 15.000 Pflanzen je ha hochgerechnet, beläuft sich die Wurzelmasse im Frühjahr 2007 in der bewässerten Teilfläche auf 69 t/ha und in der unbewässerten Teilfläche auf 44,2 t/ha. Bei den Versuchen von DROST (2007) war die Bestandesdichte allerdings mit ca. 22.000 Pflanzen je ha höher, sodass das Einzelpflanzengewicht bei seinen Versuchen geringer anzusetzen wäre. PETERSON (2005) konnte nach zweijähriger differenzierter Bewässerung in der bewässerten Variante eine Speicherwurzelfrischmasse von 2,1 kg je Pflanze feststellen und in der unbewässerten eine Frischmasse von 0,7 kg je Pflanze. Diese große Gewichts Differenz wurde in einem sehr trockenen Klima erzielt. Dies war in dem in den Versuchsjahren der Untersuchungen von PETERSON (2005) Mitte Juni bis Mitte September der Fall, da in diesem Zeitraum lediglich 55 mm Niederschlag fiel. Dadurch lässt sich auch der kleinere Unterschied der im Praxisversuch festgestellten Speicherwurzelfrischmassen erklären. Die Niederschlagsmenge auf der Versuchsfläche liegt im oben genannten Zeitraum von Mitte Juni bis Mitte September bei ca. 180 mm. Es können allerdings auch einzelne Jahre, wie 2007 auftreten, in denen im vergleichbaren Zeitraum wesentlich mehr Niederschlag fällt. KRUG & KAILUWEIT (1999) sprechen von Kronentrockenmassen (Rhizom und Speicherwurzeln) von bis zu 16 t/ha und im Mittel von 11 t/ha bei Spargelanlagen nach einer Standzeit von fünf bis sieben Jahren. Rechnet man mit den Speicherwurzel trockenmassen der Pflanzen vom

Herbst 2006, dann betrug die TM der Speicherwurzeln in der bewässerten Variante des Praxisversuchs 17,3 t/ha und in der unbewässerten Variante 10,6 t/ha. Werden zu den Speicherwurzeln noch die Rhizommassen hinzuaddiert belaufen sich die Massen in der bewässerten Variante auf 18,9 t/ha und in der unbewässerten Variante auf 11,8 t/ha. Allerdings dürften die Untersuchungen von KRUG & KAILUWEIT (1999) nicht mit der Hohertragssorte „Gijnlim“ durchgeführt worden sein. Bei den älteren ertragsschwächeren Sorten kann sicherlich von einer geringeren Wurzelmasse ausgegangen werden.

2006 wurde im Gitterbox-Versuch in der feuchten Variante eine Speicherwurzelmasse von 2,4 kg ermittelt. Im Jahr 2005 dagegen nur eine Masse von 2,0 kg. In der trocken kultivierten Variante wurde 2006 eine Einzelpflanzenmasse von 1,3 kg gemessen. Alle vorgenannten Massen erscheinen im Vergleich zu anderen Versuchsergebnissen mit einjährigen Pflanzen sehr hoch. ALDENHOFF (2004) berichtet von Massen zwischen 447 g und 572 g bei Freilandversuchen und bis 720 g je Pflanze in Gefäßversuchen. Es muss angemerkt werden, dass bei seinen Gewichtsangaben die Rhizommassen mit enthalten sind. Bei BLOOM (2003) wurden in Gefäßversuchen in 25 L-Containern Speicherwurzelmassen zwischen 285 g und 344 g ermittelt. In Freilandversuchen wurden nach zweijähriger Kulturzeit mittlere Speicherwurzelmassen von 1,4 kg je Pflanze festgestellt. Ursachen der hohen Pflanzenmassen in den Gefäßversuchen sind einerseits die erhöhte Bodentemperatur in den Gitterboxen. Da die Boxen in einer Höhe von ca. einem Meter stehen, kann die komplette Außenhülle der Boxen von der Sonne beschienen und erwärmt werden, was zu einer höheren Bodentemperatur im Gefäß im Vergleich zum gewachsenen Boden führt. Nach YEN (1993) und YEN et al. (1996) liegt die Optimaltemperatur für das Speicherwurzelwachstum bei ca. 30°C. Diese Temperaturen wurden in den Gitterboxen in allen Versuchsjahren während des Sommers fast täglich erreicht. Andererseits ist eine gute Wasserversorgung nötig, damit die Pflanzen ihr maximales Wachstum darstellen können. Auch beim Vergleich der Ergebnisse mit Versuchen von PASCHOLD & MAYER (2006), die Spargel in Lysimetern zwei Jahre lang kultivierten und Trockenmassen zwischen 200 g und 750 g je nach verabreichter Bewässerungsmenge erreichten, sind die im Gitterbox-Versuch ermittelten Trockenmassen von 677 g und 389 g bei den beiden Varianten im Jahr 2006 sehr hoch anzusetzen, da im Gitterbox-Versuch die Pflanzen bereits nach einem Kulturjahr

ausgewertet wurden. Aber auch bei diesem Vergleich sind die höheren Bodentemperaturen in den Gitterboxen im Vergleich zu den Lysimetern (MAYER 2007) als weitere Erklärung der großen Unterschiede heranzuziehen. MAYER & PASCHOLD (2007) konnten bei Gefäßversuchen in 15 L-Containern bei einer Bewässerung ab -200 hPa eine Speicherwurzel trockenmasse von 375 g und bei einer Bewässerung ab -700 hPa eine Trockenmasse von 275 g je Pflanze messen. Bei ihren Versuchen waren diese Massen jedoch nicht signifikant verschieden. Bei den kleinen 15 L-Containern ist das Speicherwurzelgewicht durch das begrenzt durchwurzelbare Bodenvolumen reduziert, sodass diese Ergebnisse nicht direkt vergleichbar sind. DROST & WILSON (2002) rechneten aus einer Stichprobe mit einem Bohrstock auf die gesamte Wurzelmasse hoch. Laut ihren Berechnungen sollte eine Pflanze auf ein Speicherwurzelgewicht von über 20 kg kommen. Diese Berechnung sollte in Zweifel gezogen werden, da die angegebenen Speicherwurzelmassen ca. das Fünffache der durchschnittlichen Speicherwurzelmasse im vorliegenden Praxisversuch betragen würden und in keiner anderen Literaturangabe solch große Speicherwurzelmassen erwähnt werden.

WILCOX-LEE & DROST (1990) berichten von einer unterschiedlichen Reaktion zweier Spargelsorten auf ein reduziertes Wasserangebot. Da in der vorliegenden Arbeit alle Versuche mit der Sorte „Gijnlim“ durchgeführt wurden, können Aussagen zu Sorteneinflüssen nicht gemacht werden.

Die unterschiedliche Entwicklung der Speicherwurzel trockenmassen während des Winterhalbjahres 2006/2007 zwischen der bewässerten und unbewässerten Variante des Praxisversuches lässt sich durch das verschiedene Abreifeverhalten der beiden Varianten erklären. Während in der bewässerten Variante zum Zeitpunkt der Probeentnahme bereits alle Triebe abgestorben waren und damit die Rückverlagerung der Reserve- und Nährstoffe abgeschlossen war, konnten bei der unbewässerten Variante noch grüne bzw. noch nicht abgestorbene Triebe erfasst werden. Die unbewässerten Pflanzen konnten somit noch an Trockenmasse zulegen, während die bewässerten Pflanzen bereits ihr Maximum erreicht hatten.

Die Bohrstockmethode zur Ermittlung der Wurzelverteilung im Bodenprofil ist in der Landwirtschaft weit verbreitet (BÖHM 1979 und SMIT et al. 2000). Ein Problem dieser Methode ist die große Streuung der Werte. Aufgrund dieser großen Streuung können

kleine Unterschied in der Wurzelverteilung nicht erfasst werden (CLAASSEN 1990). Die verwendete Wurzellängenmessung am PC mittels spezieller Software stellt eine Weiterentwicklung der Abschätzung der Wurzellänge nach der Methode von TENNANT (1975) dar. Die Verteilung der Speicherwurzeln im Bodenprofil wurde von verschiedenen Autoren untersucht. YAKUWA et al. (1982) ermittelten, dass bei Grünspargel in der Bodentiefe 0-20 cm ca. 60 % der Speicherwurzelmasse, in der Tiefe 20-40 cm Bodentiefe ca. 30 % und in der Tiefe 40-60 cm nur noch 10 % der Speicherwurzelmasse vorhanden ist. Im Mittel über alle Probenahmeterminale waren in der bewässerten Variante in der Tiefe 0-15 cm 35 % der Speicherwurzel trockenmasse, in der Tiefe 15-30 cm 48 %, in der Tiefe 30-45 cm 13 % und in der Tiefe 45-60 cm nur noch 5 % der Speicherwurzel trockenmasse. In der unbewässerten Variante waren in der obersten Bodenschicht 40 %, in der darunter liegenden Schicht 56 % und in der Tiefe 30-45 cm 4 % der Speicherwurzel trockenmasse. In der unteren Bodenschicht wurden keine Speicherwurzeln mehr gefunden. Auch DROST & WILCOX-LEE (2000) berichten bei Versuchen zur Bodenbearbeitung bei Spargel von den höchsten WLD in einer Tiefe von ca. 30 cm. Bei ihren Versuchen waren unterhalb von 60 cm nur noch sehr wenige Speicherwurzeln zu finden. Sie führen den Unterschied zwischen zwei Varianten auf die große Streuung und Probenahmeunterschiede zurück. DROST & WILSON (2002) untersuchten die unterschiedliche Durchwurzelung auf Standorten mit schwerem Boden und sehr leichtem Boden. Sie fanden auf dem lehmigen Boden eine höhere WLD als auf dem sandigen Standort. Dies steht in Übereinstimmung mit den hier gefundenen Ergebnissen, wonach in der bewässerten Variante eine wesentlich höhere WLD vorhanden ist. Auf dem schweren Standort wird mehr pflanzenverfügbares Bodenwasser gespeichert, sodass die Pflanzen später in Wasserstressbedingungen geraten und somit eine größere Speicherwurzelmasse aufbauen können. DROST & WILSON (2002) fanden Wurzellängendichten zwischen $0,7$ und $1,0 \text{ mm cm}^{-3}$ und WTMD zwischen $0,5$ und $11,0 \text{ mg cm}^{-3}$. Im hier durchgeführten Praxisversuch lag die WLD zwischen $0,2$ und $0,7 \text{ mm cm}^{-3}$ und die WTMD zwischen $0,1$ und $33,0 \text{ mg cm}^{-3}$. Von Wurzellängendichten in diesem Bereich berichten auch WEINHEIMER & PASCHOLD (2007 b). DROST (2007) berichtet von WTMD von bis zu 30 mg cm^{-3} in einer Tiefe von 10-20 cm bei Versuchen zur optimalen Bewässerungstechnik in den USA. Die höchsten WTMD wurden bei seinen Versuchen in der Tröpfchenbewässerungsvariante erreicht. Bei den höchsten WTMD wiesen die Pflanzen eine Frischmasse von 69 t/ha auf. Im hier durchgeführten

Praxisversuch betrug die Frischmasse ebenfalls 69 t/ha bei einer WTMD von 33 mg cm^{-3} . Dies macht deutlich, dass sowohl die Ermittlung der WTMD per Stichprobe mit dem Bohrstock als auch per Ausgraben ganzer Pflanzen ähnliche Speicherwurzelfrischmassen ergaben. Die Verteilung der Speicherwurzeln im Bodenprofil ist ähnlich. Die Speicherwurzeln konzentrieren sich auf den Bereich unmittelbar in der Nähe zur Krone, in einer Tiefe von 10-30 cm. BASSOI et al. (2001) berichten von ihren in Brasilien durchgeführten Versuchen. Auch sie fanden die meisten Wurzeln oberhalb von 60 cm Bodentiefe.

DROST & WILSON (2003) berichten von einer Reduktion der Speicherwurzeltrockenmasse während der Erntephase und einem Wiederanstieg der WTMD während des Sommers bis hin zum Winter. Im durchgeführten Praxisversuch stieg in beiden Jahren und in beiden Varianten während der Erntephase sowohl die WLD als auch die WTMD an. Daraus ist zu schließen, dass auf der Praxisfläche das Speicherwurzelwachstum bereits während der Erntephase begann. Auf dieser Fläche wurden im Jahr 2005 die höchste WLD im Sommer gemessen, während im Jahr 2006 die größte WLD im Herbst vorlag. Die geringsten WTMD wurden jeweils direkt nach Ernteende ermittelt, also zum Zeitpunkt als die Phyllokladien noch nicht ausgebildet waren.

VAN DAM et al. (1987) untersuchten den Einfluss einer Tiefenbodenbearbeitung vor dem Pflanzen auf das Wurzelwachstum von Spargel mit Hilfe von Profilgruben und so genannten „root maps“. In der unbearbeiteten Variante konzentrierten sich die Speicherwurzeln auf die oberen 35 cm des Bodenhorizonts, während sie in der bearbeiteten Variante tiefer wurzelten. Bei der Kartierung der Wurzeln wurden keine Wiederholungen durchgeführt, sodass die Ergebnisse nur als Punktaufnahme an der Stelle anzusehen sind, an der die Beprobung stattfand. Mit der gleichen Methode untersuchte VAN DAM (1973) den Einfluss der Bodenart auf die Wurzelverteilung im Bodenprofil unter niederländischen Anbaubedingungen. Auf den untersuchten Flächen betrug der Humusgehalt mindestens 7 % und der Grundwasserstand lag zwischen 40 cm und 120 cm Bodentiefe. Er gibt an, dass die meisten Speicherwurzeln in der Bodenschicht oberhalb von 60 cm wachsen und einzelne Wurzeln bis in eine größere Tiefe vordringen können. Diese Tiefenverteilung ist von der Bodenart abhängig. Die Untersuchung zeigt allerdings auch, dass es sehr große Streuungen zwischen den

einzelnen Wiederholungen in der Bewurzelungstiefe gibt. Trotz dieser Streuungen lautet das Fazit des Autors, dass die Ertragspotenz einer Spargelpflanze steigt, wenn größere Bodenschichten durchwurzelt sind. Nach den hier vorliegenden Ergebnissen kommt es nicht nur auf die Größe der durchwurzelten Bodenschicht, sondern im Wesentlichen auf die Speicherwurzelmasse an. Hingegen können in einem größeren Bodenvolumen auch mehr Speicherwurzeln wachsen, womit diese beiden Faktoren zusammenhängen und nicht separat voneinander betrachtet werden können. Auch REJIMERINK (1973) nutzte die „root map“ Methode um den Einfluss der Bodenart auf das Wurzelwachstum zu untersuchen. Auch er gibt nur die Ergebnisse von einer Profilgrube je Variante an und leitet daraus Ergebnisse ab. Aufgrund der großen Streuung sind diese kritisch zu bewerten.

DROST (1999 a) untersuchte den Einfluss verschiedener Bewässerungsgaben auf das Speicherwurzelwachstum bei Versuchen in einem Wüstenklima. Diese Ergebnisse zeigen, dass sowohl bei der Kontrolle ohne Bewässerung, als auch bei der am intensivsten bewässerten Variante die meisten Wurzeln in der Nähe der Krone zu finden waren. In der unbewässerten Variante wuchsen die Wurzeln in einem Bereich ca. 20 cm rechts und links des Rhizoms und bis in eine Tiefe von ca. 40 cm. Die intensiv bewässerte Variante wurzelte ebenfalls bis in eine Tiefe von 40 cm hingegen bis in einen Abstand von 40 cm nach rechts und links neben dem Rhizom. Diese Ergebnisse decken sich mit den im Praxisversuch gefundenen Ergebnissen, wonach die Bewässerung keinen Einfluss auf das Tiefenwachstum, sondern nur auf das horizontale Wachstum hat. Auch die Wurzelanzahl nimmt bei DROST (1999 a) mit steigender Bewässerung zu. So konnte er in der stark bewässerten Variante bis zu 200 Speicherwurzeln je Pflanze zählen und in der unbewässerten nur 75 Stück. Im Praxisversuch weist die bewässerte Variante auch eindeutig eine höhere WLD und damit mehr Wurzeln je Bodenvolumen auf. Daneben gibt der Autor der oben genannten Untersuchung an, dass es zu großen Schwankungen in der Wurzelanzahl innerhalb der Varianten in den unterschiedlichen Jahren kommt. PETERSON (2005) erzielte vergleichbare Ergebnisse. Auch in diesen Untersuchungen änderte sich die Durchwurzelung des Bodens nicht, lediglich die WLD der Speicherwurzeln war in den bewässerten Varianten stark erhöht.

Eine tiefere Durchwurzelung des Bodens stellt sicher, dass die Pflanze auch in Trockenperioden genügend Wasser aus dem Boden aufnehmen kann, da ihr ein größeres

Bodenvolumen zur Verfügung steht. Das dürfte bei den Speicherwurzeln nicht von großer Bedeutung sein, da diese Wurzeln lediglich in einem geringen Umfang Wasser aufnehmen können und vorrangig der Speicherung von Reservestoffen dienen.

Lediglich an zwei Terminen konnten signifikante Unterschiede hinsichtlich des Speicherwurzeldurchmessers zwischen den Varianten des Praxisversuchs ermittelt werden. An diesen Terminen war der mittlere Speicherwurzeldurchmesser in der unbewässerten Variante signifikant höher. Somit kann der in der Literatur (BENGOUGH 2003) beschriebene Effekt einer Zunahme des Wurzeldurchmessers bei Trockenheit auch für Spargel-Speicherwurzeln bestätigt werden. Der gemessene Durchmesser zwischen 3,8 mm und 6,6 mm liegt im Bereich der in der Literatur angegebenen Werte (BLASBERG 1932, HARTMANN 1989).

Der Trockensubstanzgehalt der Speicherwurzeln zeigt in beiden Varianten und in beiden Jahren einen eindeutigen Verlauf. Zu Beginn des Jahres liegt der Trockensubstanzgehalt auf einem hohen Niveau. Während der Ernte und weiterhin während des Triebwachstums bis zum Entfalten der Phyllokladien geht der Trockensubstanzgehalt auf ein Minimum zurück. Nach dem Entfalten der Phyllokladien steigt der Gehalt wieder an bis zu einem Maximum im Herbst. Während der Winterperiode geht der Trockensubstanzgehalt dann wieder etwas zurück. Die Gründe für den Rückgang könnte die im Kapitel 4.4 beschriebene Verlagerung von Reservestoffen in das Rhizom sein oder die bei MARTIN (1989) beschriebenen Verluste durch Veratmung.

4.3.1 Zeitlicher Verlauf des Speicherwurzelswachstums in den Gitterboxen

Tabelle 19 zeigt, dass die Parameter p_1 innerhalb derselben Varianten sehr nahe beieinander liegen. Die Wendepunkte bei der bewässerten Variante wurden jeweils Mitte August erreicht, während die Wendepunkte bei der unbewässerten Variante auf Ende August/Anfang September fielen. Auch EHLER & STÜTZEL (2005) beschreiben eine Zunahme der Wurzelanzahl in Gefäßversuchen bis Ende August und dann eine stagnierende Wurzelanzahl. HAYNES (1987) hingegen beobachtete in Feldversuchen in Neuseeland eine sehr starke Zunahme des Speicherwurzengewichtes ab Ende Juli, die bis in den November hinein andauerte (Monatangaben sind auf die Nordhalbkugel projiziert). Im Praxisversuch der vorliegenden Arbeit konnte bei den Speicherwurzeln festgestellt werden, dass es einen Zuwachs an WLD bis zum Juli bzw. August-Termin

kam (Tabelle 8). Danach sank die WLD und im Oktober konnten dann wieder höhere WLD gemessen werden. Dieser Verlauf lässt sich nur dadurch erklären, dass es bereits ab dem Ernteende zu einer Wurzelneubildung kommt. Im Laufe des Sommers, vorrangig im August sterben dann alte Speicherwurzeln ab. Der Zuwachs an neuen Wurzeln hält bis in den Oktober hinein an. Da aber keine alten Wurzeln mehr absterben nimmt die WLD wieder sehr stark zu. In den Gitterboxen sind keine alten Speicherwurzeln vorhanden, sodass der Zuwachs bis in den Oktober andauert.

BERLINER & OOSTERHUIS (1987) konnten durch Versuche mit Weizen in Lysimetern feststellen, dass sich die Durchwurzelung zwischen gewachsenem Boden und Lysimetern deutlich unterscheiden. Daneben reagieren die Pflanzen im Lysimeter auf eine reduzierte Bewässerung stärker, da sich eine reduzierte Bewässerung im Gefäß schneller auf das Wachstum auswirkt.

4.4 Einfluss der Bewässerung auf das Rhizomwachstum

Der Einfluss der Bewässerung auf das Rhizom ist nur zu ermitteln, wenn ganze Pflanzen ausgegraben werden. Hierzu wurden sowohl in Gefäßen als auch im Freiland die Rhizommerkmale erfasst. Beim Versuch unter Praxisbedingungen wurde ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Varianten festgestellt. In der bewässerten Variante nahmen die Frisch- und auch die Trockenmasse vom Frühjahr 2005 bis zum Frühjahr 2007 kontinuierlich zu. In der unbewässerten Variante konnte lediglich eine Zunahme der Trockenmasse vom Frühjahr 2005 bis zum Frühjahr 2006 festgestellt werden. An den folgenden Untersuchungsterminen zeigte sich keine Veränderung in der Rhizomtrockenmasse. Die Veränderung der Trockenmasse während des Winters konnte auch von WEINHEIMER & PASCHOLD (2007 a) in Gefäßversuchen festgestellt werden. Sie beobachteten eine Verlagerung von Trockensubstanz aus den Speicherwurzeln in das Rhizom. Auch im Containerversuch zur Bestimmung der RKH-Dynamik wurde eine Abnahme der Speicherwurzel-trockenmasse bei einer gleichzeitigen Zunahme der Rhizomtrockenmasse während des Winters festgestellt (Ergebnisse nicht dargestellt). Die im Praxisversuch gestiegene Trockenmasse im Rhizom während des Winters ging ebenfalls mit einer Absenkung der Zuckergehalte in den Speicherwurzeln einher (Abbildung 34). DROST (1996) beschreibt bei Feldversuchen in einem Wüstenklima die größte Zunahme an Rhizommassen bei der intensivsten Bewässerung. In den Gitterboxversuchen konnte das Rhizomgewicht lediglich am Versuchsende erfasst

werden. Es wurden Unterschiede sowohl in der Frisch- und Trockenmasse als auch in der Clusteranzahl festgehalten. Die erhöhten Rhizommassen bei gesteigerter Bewässerungsintensität konnten auch von PASCHOLD & MAYER (2006) und von BLOOM (2003) in Gefäßversuchen ermittelt werden. DROST & WILCOX-LEE (1997 a und b) erzielten die größten Rhizommassen in Gefäßversuchen bei einer Bewässerung ab einer Saugspannung von -500 hPa. Im zweiten Versuchsjahr ließen sich allerdings keine Unterschiede mehr zwischen den Varianten absichern. DROST (1994) berichtet über erhöhte Knospenbildung bei gesteigerter Bewässerung. Im Gitterboxversuch wurden in den Jahren 2006 und 2007 in der feuchten Variante 10 Cluster pro Pflanze und in der trockenen Variante nur 8 Cluster gezählt. Es kann keine Aussage zu den Knospengrößen gemacht werden. Da allerdings ein Cluster, als eine Ansammlung von Knospen mit mindestens einer dicken Knospe definiert war, bedeutet dies, dass bei einer erhöhten Anzahl an Clustern auch mehr dicke Knospen vorhanden waren. Laut DEAN (1996) sowie NICHOLS & WOOLLEY (1985) hängt die Dicke einer Stange von der Knospendicke ab. Somit führen mehr Cluster zu mehr dicken Knospen und somit steigt das Ertragspotenzial die Qualität des Ernteproduktes mit zunehmender Bewässerung an. Hinsichtlich der Rhizomfrischmasse konnten im Gitterbox-Versuch keine signifikanten Unterschiede erkannt werden. Auch die Trockenmasse war nicht unterschiedlich.

4.5 Einfluss der Bewässerung auf das Faserwurzelwachstum

Die Bestimmung der Faserwurzelmassen und -längen ist sehr arbeits- und zeitintensiv (BÖHM 1979). Auch lassen sich die Faserwurzeln nicht vollständig erfassen und es muss immer mit einem Verlust an Wurzeln bei der Probenaufbereitung gerechnet werden. Durch die gewählte Arbeitsweise in der vorliegenden Arbeit wurde versucht, die Verluste an feinen Wurzeln zu minimieren. Allerdings wurden nach dem Auswaschen der Proben im Aufbereitungsbecken immer wieder Faserwurzeln gefunden, die nicht mehr einzelnen Proben zugeordnet werden konnten. Daher ist davon auszugehen, dass die Ergebnisse hinsichtlich der Faserwurzelmerkmale eine Unterschätzung darstellen. Der ermittelte Durchmesser der Faserwurzeln liegt mit ca. 1 mm im Bereich der in der Literatur angegebenen Werte (BLASBERG 1932). Lediglich an zwei Probenahmeterminen konnte ein Unterschied zwischen den bewässerten und den unbewässerten Pflanzen ermittelt werden. An diesen beiden Terminen war der Durchmesser der Faserwurzeln in der unbewässerten Variante jeweils größer. Dies steht

in Übereinstimmung mit den Ergebnissen von BENGOUGH (2003), der von einer Zunahme des Wurzeldurchmessers von Erbsen bei höherem Bodenwiderstand durch Austrocknung des Bodens berichtet. Der Vergleich mit dem mittleren Wurzeldurchmesser von Gurken und Tomaten, die einen mittleren Durchmesser von 0,4 mm (KRUG 2002) aufweisen, zeigt, dass Spargel besonders dicke Faserwurzeln besitzt. Daneben wurden an den Faserwurzeln keine Wurzelhaare gefunden. Auch im Vergleich zu anderen Kulturpflanzen, die einen mittleren Durchmesser von 0,1 mm bei Mais bis zu 0,7 mm bei Citruspflanzen (EISSENSTAT 1992) haben, besitzt Spargel mit 1,0 mm einen vergleichsweise großen Durchmesser seiner Faserwurzeln. Da mit steigendem Durchmesser die Nährstoffaufnahme (BARBER & SILBERBUSH 1984) abnimmt, ist zu schließen, dass Spargel nicht das volle Nährstoffangebot ausnutzt.

Bei der Verteilung der Wurzeln im Bodenprofil nimmt Spargel eine Sonderstellung ein. Kulturpflanzen wie Getreide (MAX 2004, WEAVER 1926), verschiedene Gemüsearten (GREENWOOD 1982, WEAVER & BRUNER 1927), Gräser (KUTSCHERA 1960) sowie Waldbäume und Sträucher (KUTSCHERA & LICHTENEGGER 2002) weisen eine mit der Bodentiefe exponentiell abnehmende WLD auf. Anders verhält sich die Verteilung bei Spargel. Da die Faserwurzeln aus den Zentralzylindern der Speicherwurzeln entspringen, werden auch junge Faserwurzeln in den Bodenschichten angelegt, in welchen die Speicherwurzeln wachsen. Es wäre zu vermuten, dass in den Bodenbereichen, in denen die höchsten Speicherwurzellängendichten vorhanden sind, auch die meisten Faserwurzeln zu finden sind. In Abbildung 36 ist allerdings zu erkennen, dass zwischen diesen beiden Wurzelverteilungen kein Zusammenhang besteht. Eine Erklärung für den mangelnden Zusammenhang ist, dass sich die Faserwurzeln erst in einigen cm Entfernung zu den Speicherwurzeln verzweigen. Es gab auch immer wieder Bohrkerne, in denen Speicher- aber keine Faserwurzeln vorhanden waren. Diese Speicherwurzeln zeichneten sich durch eine sehr dunkelbraune Färbung auf, was ein Indiz für zunehmendes Alter der Speicherwurzeln ist. Auch ganz junge Speicherwurzeln mit einer weißen Färbung wiesen keine Faserwurzeln auf. DROST (1999) zählte die Faserwurzeln im Bodenprofil. Er fand die meisten Faserwurzeln bei allen Varianten in unmittelbarer Nähe zum Rhizom. Daneben wies die am intensivsten bewässerte Variante die höchste Anzahl an Faserwurzeln auf. Dies steht im Gegensatz zur im Praxisversuch ermittelten Verteilung.

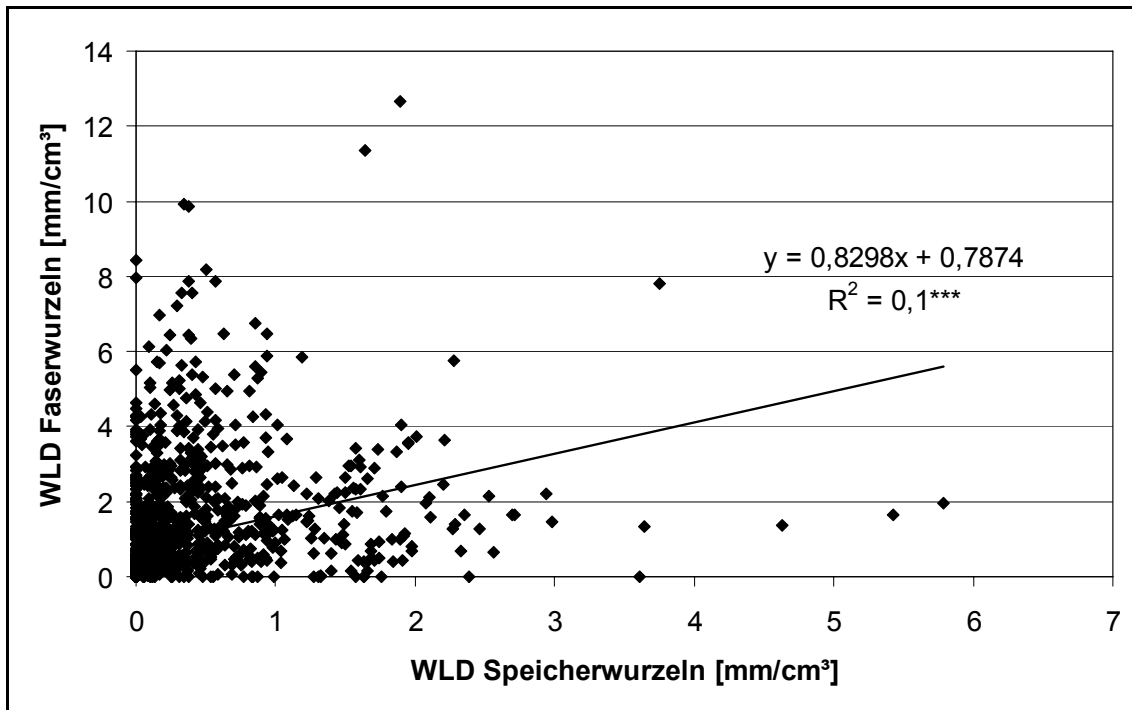


Abbildung 36: Zusammenhang zwischen Wurzellängendichte der Speicherwurzeln und WLD der Faserwurzeln. Werte der Bohrstockproben auf der Praxisfläche (n=1280)

Die ermittelte mittlere Wurzellängendichte von $0,3 \text{ mm cm}^{-3}$ bis $2,3 \text{ mm cm}^{-3}$ liegt unter den Werten von DROST & WILSON (2002 und 2003). Die Autoren stellten in Abhängigkeit von der Bodenart und dem Probesternin eine WLD der Faserwurzeln zwischen $1,9 \text{ mm cm}^{-3}$ und 15 mm cm^{-3} fest. Der Unterschied zu den in der vorliegenden Arbeit ermittelten Werten kann darin liegen, dass die in der Literatur beschriebenen Werte in Neuseeland bei Grünspargel ermittelt wurden. Diese Werte liegen im Bereich, die bei Zwiebel gemessen wurden. Diese liegen laut GREENWOOD et al. (1982) bei einer mittleren WLD von bis zu 5 mm cm^{-3} . Im Gegensatz dazu berichten dieselben Autoren bei Blumenkohl von einer WLD bis zu 30 mm cm^{-3} . Im Vergleich dazu können Getreidearten unter deutschen Anbaubedingungen WLD von bis zu 200 mm cm^{-3} und Raps eine WLD von bis zu 150 mm cm^{-3} erreichen (MAX 2004). Unter spanischen Anbaubedingungen wurden bei Apfelbäumen auf verschiedenen Unterlagen WLD der Feinwurzeln (Wurzeln mit einem Durchmesser kleiner 2 mm) zwischen $0,3$ und $1,1 \text{ mm cm}^{-3}$ gemessen (DA SILVA et al. 1999).

KAGE & EHLERS (1996) geben zu bedenken, dass es ab einer WLD kleiner 1 mm cm^{-3} zu reduzierter Wasseraufnahme durch die Wurzeln kommen kann, da die Wassernachlieferung an die Wurzel reduziert ist. Dieser Wert wurde im März in beiden Praxisversuch-Varianten in großen Bereichen des Bodens unterschritten. In dieser Wachstumsphase brauchen die Pflanzen jedoch noch keine großen Wassermengen, da das Triebwachstum noch nicht begonnen hat und der Wasserbedarf gering ist. Während der Erntephase nahm die WLD in beiden Varianten stark zu, sodass die Pflanzen aus dem noch ausreichend mit Wasser versorgten Boden ihren Wasserbedarf decken konnten. Bei den Probenahmen im August und im Oktober zeigte sich dann jedoch ein anderes Bild. Während die bewässerte Variante den kompletten Bodenraum durchwurzelt hatte, befanden sich in der unbewässerten Variante unterhalb von 45 cm keine Faserwurzeln mehr. Die Konzentration der Faserwurzeln im oberen Bodenbereich lässt sich durch eine rasche Wirkung von Niederschlagsereignissen auf das Faserwurzelwachstum erklären. In beiden Versuchsjahren fielen auf der Versuchsfläche im August überdurchschnittlich hohe Niederschläge. Da die Proben jeweils erst gegen Ende August entnommen wurden, hatten die Pflanzen noch Zeit Faserwurzeln zu bilden. Da die Niederschlagsereignisse den Boden jedoch nicht bis in eine große Tiefe durchfeuchteten, konzentrierten sich die Wurzeln im oberen Bodenbereich. Ähnliche Ergebnisse stellten PALESE et al. (2000) bei Oliven fest. Sie konnten in einer Trockenperiode wenige Tage nach einem Niederschlagsereignis in der unbewässerten Kontrollparzelle eine sehr starke Zunahme an Faserwurzeln nachweisen. KAGE et al. (2004) stellten bei Blumenkohl fest, dass die Pflanzen, die nach dem Auspflanzen und folgendem Angießen nicht mehr bewässert wurden, eine Verdopplung des Geschwindigkeit des Tiefenwachstum im Vergleich zu bewässerten Pflanzen aufwiesen. Ähnliche Ergebnisse erzielten HOOGENBOOM et al. (1987) mit Sojabohne und ASSENG et al. (1997) mit Weizen. Es ist allerdings davon auszugehen, dass bei den Versuchen mit Blumenkohl unter norddeutschen Anbaubedingungen eine ausreichende Bodenfeuchte in der Tiefe vorlag, wohingegen beim Praxisversuch der Boden in der unbewässerten Variante im Sommer bis zur unteren Bodenschicht stark ausgetrocknet war, sodass die Pflanzen kein Wasser mehr aus diesen Bodenschichten aufnehmen konnten. Daher lagen in diesen Bodenhorizonten keine Faserwurzeln mehr vor.

DROST & WILSON (2002 und 2003) konnten auf sandigem Lehm Boden die höchsten WLD in einer Tiefe unterhalb von 60 cm messen. In diesen Bodenschichten ermittelten sie ein WLD von bis zu 200 mm cm^{-3} . Die höchste WLD, die im Praxisversuch gemessen wurde, lag bei $12,7 \text{ mm cm}^{-3}$. Daher erscheinen die Werte von DROST & WILSON (2002 und 2003) sehr hoch, zumal sie in großen Tiefen erfasst wurden. Auf einem schwereren Boden konnten diese beiden Autoren die größten WLD in Tiefen zwischen 20 cm und 30 cm feststellen. Die Werte lagen bei ca. 120 mm cm^{-3} . Auch diese Werte erscheinen noch sehr groß. Vergleicht man dazu die bei DROST & WILSON (2002 und 2003) angegebenen Trockenmassendichten, fällt auf, dass die WLD größer ist, aber die Wurzel trockenmassendichten um den Faktor 10 kleiner sind als im Praxisversuch ermittelt. Höhere WLD der Faserwurzeln auf schwererem Boden konnten auch WEINHEIMER & PASCHOLD (2007 b) feststellen. In diesen Böden ist die nutzbare Feldkapazität größer als in leichteren Böden. EHLERS (1996) gibt an, dass mit steigender nutzbarer Feldkapazität die WLD zunimmt.

Der oben beschriebene zeitliche Verlauf der WLD steht in Übereinstimmung mit den Ergebnissen von DROST & WILSON (2002 und 2003). Auch sie fanden während der Laubwachstumsphase die meisten und während der Winterphase die wenigsten Faserwurzeln. LEDARD et al. (1992) untersuchten die Stickstoffaufnahme von Spargel mit radioaktiven Stickstoff. Sie stellten während der Erntephase fast keine Nährstoffaufnahme fest. Dies lässt sich mit der sehr geringen Anzahl an Faserwurzeln während der Erntephase erklären und stützt die im Praxisversuch gefundenen Ergebnisse.

REIJMERINK (1973) untersuchte die Wurzelverteilung von Spargel auf verschiedenen Böden in den Niederlanden. Er stellte eine Veränderung der Durchwurzelung des Bodens in Abhängigkeit vom Alter der Pflanzen fest. Er beschreibt, dass die Durchwurzelungstiefe mit dem Pflanzenalter steigt. Aus den Gitterbox-Versuchen wird dagegen deutlich, dass die Pflanzen den Boden im ersten Standjahr bereits bis in eine Tiefe von 80 cm erschließen können. Es wird nach neueren Untersuchungen (KRUG et al. 2002) auch davon ausgegangen, dass sich die Speicherwurzelmasse nach dem 4. Standjahr nicht mehr verändert und dass nach diesem Zeitpunkt die Faserwurzeln den gesamten Bodenraum, der für sie zugänglich ist, bereits erschlossen haben. Der oben

genannte Autor untersuchte je Variante nur eine Wiederholung. Aufgrund der großen Streuung der Wurzelverteilung erscheinen diese Ergebnisse nicht gesichert.

Vergleicht man die ermittelten Wurzellängen je m^2 Bodenoberfläche ist festzustellen, dass Spargel den Boden nur sehr schwach durchwurzelt. In der bewässerten Variante lag die höchste Gesamtwurzellänge im Oktober 2006 mit $1,0 \text{ km/m}^2$ und in der unbewässerten Variante lag im August 2006 die höchste Gesamtwurzellänge mit $0,6 \text{ km/m}^2$ vor. GREENWOOD et al. (1982) stellten bei Blumenkohl eine Länge von bis zu 12 km/m^2 und bei Zwiebel bis zu $1,8 \text{ km/m}^2$ fest. BARLEY (1970) konnte bei Gräsern Wurzellängen von bis zu 300 km/m^2 und bei krautigen Kulturpflanzen zwischen 5 km/m^2 und 50 km/m^2 feststellen. MAX (2004) gibt für Getreide Wurzellängen von 35 km/m^2 und für Raps Längen von 45 km/m^2 in der Bodenschicht 0-60 cm an. Zu berücksichtigen ist allerdings, dass Spargel in erheblich geringere Pflanzendichte kultiviert wird als die anderen genannten Pflanzenarten.

Die spezifische Wurzellänge (SWL) dient als Maß für den Aufwand, den eine Pflanze für den Aufbau dieser Wurzelfraktion betreiben muss. Im vorliegenden Praxisversuch wurden Werte zwischen 6 m gTM^{-1} und 23 m gTM^{-1} gemessen. Im Vergleich zu den einjährigen Kulturen Gurke und Tomate, die SWL von 220 m gTM^{-1} bzw. 100 m gTM^{-1} erreichen können (KRUG 2002), erscheint dies niedrig. Zieht man allerdings die Werte von mehrjährigen Bäumen heran, bei denen Werte der Feinwurzeln zwischen 10 m gTM^{-1} und 30 m gTM^{-1} erreichen (EMMERICH 2002), liegen die Werte von Spargel in diesem Bereich. Mit Ausnahme des Probenahmetermins Oktober 2005 war die SWL in der unbewässerten Variante an allen Terminen niedriger als in der bewässerten. Das bedeutet, dass die unbewässerten Pflanzen wesentlich mehr Energie zur Ausbildung ihres Faserwurzelsystems aufwenden müssen als die bewässerten. Diese Stoffmengen können nicht mehr gespeichert und zur Bildung des nächstjährigen Ertrages verwendet werden. Die höheren Werte der SWL in den Sommermonaten im Vergleich zu den Frühjahrsmonaten deuten auf eine starke Wurzelneubildung in diesen Monaten hin. Dies bedeutet allerdings auch, dass im Oktober 2005 nochmals zu einer massiven Faserwurzel-Neubildung in der unbewässerten Variante gekommen ist. Zu erklären ist das durch die Niederschläge die bis Ende Oktober des Jahres gefallen sind. Durch die hohen Niederschläge nach langer Trockenheit konnten die Pflanzen wieder Wasser

aufnehmen und haben somit neue Faserwurzeln gebildet, um Ihren Wasserbedarf decken zu können.

Auch der Trockensubstanzgehalt der Faserwurzeln lag im August und im Oktober bei der unbewässerten Variante über dem Gehalt der bewässerten. Durch die Erhöhung des Trockensubstanzgehaltes ist auch bei den Faserwurzeln von einer Erhöhung des osmotischen Potentials in den Zellen auszugehen. Durch dieses höhere Potential in den Wurzelzellen können die Pflanzen das Bodenwasser besser ausnutzen, indem der Potentialgradient zwischen Bodenmatrix und Pflanze vergrößert wird. CALDWELL & RICHARDS (1989) beschriebene den Effekt des „hydraulic lift“, nach dem Pflanzen in der Nacht Wasser aus tiefen Bodenschichten aufnehmen und durch die Wurzeln in Bodennähe wieder an den Boden abgeben, um dieses Wasser dann tagsüber wieder aufzunehmen. Es ist davon auszugehen, dass dies in der unbewässerten Variante nicht stattfindet, da die für dieses Verhalten notwendigen Wurzeln in tieferen noch feuchten Bodentiefen nicht vorhanden sind.

CALDWELL (1987) und YOUNG (1989) gehen davon aus, dass es ab einem mittleren halben Wurzelabstand von 0,18 cm bis 0,25 cm zur Konkurrenz um Nitrat, eventuell auch zur Konkurrenz um Kalium, jedoch nicht zur Konkurrenz um Phosphat kommen kann. MARSCHNER (1995) gibt die Erschöpfungszone für Nitrat mit einem Wurzelabstand von größer 0,1 cm bis 0,2 cm an. Damit kann es ab einem halben Wurzelabstand in dieser Größenordnung zu einem Konkurrenzverhalten der Wurzeln um diesen Nährstoff kommen. Die gemessenen mittleren halben Wurzelabstände liegen jedoch weit über diesem Bereich. Der kleinste mittlere halbe Wurzelabstand lag im Oktober 2006 auf der bewässerten Teilfläche in einer Bodentiefe von 0-15 cm und in einem Abstand zur Reihenmitte von 30 cm mit einem Wert von 0,5 cm vor. Anhand dieser Daten lässt sich die geringe Ausnutzung der Nährstoffvorräte von Spargel festmachen. Auch muss man aus diesen Werten ableiten, dass es zu massiven Auswaschungen von leicht mobilen Nährstoffen wie Nitrat oder auch Kalium bei einer nicht angepassten Bewässerungssteuerung kommen kann. Dieses Problem wird umso größer je leichter und je sorptionsschwächer der Boden auf der Anbaufläche ist.

4.5.1 Zeitlicher Verlauf des Faserwurzelwachstums in den Gitterboxen

Unter trockenen Bedingungen ist das Wurzelwachstum häufig nicht so stark reduziert, wie das Triebwachstum, was zur Folge hat, dass das Wurzel:Spross-Verhältniss steigt (MARSCHNER 1995). Das würde erklären, warum der Unterschied im Faserwurzelwachstum so gering ausfällt. Erwartet wurde ein wesentlich größerer Unterschied. BERLINER & OOSTERHUIS (1987) konnten durch Versuche mit Weizen in Lysimetern feststellen, dass sich die Durchwurzelung zwischen Pflanzen in gewachsenem Boden und Lysimetern deutlich unterscheiden. Daneben reagieren die Pflanzen im Lysimeter auf eine reduzierte Bewässerung stärker, da sich eine reduzierte Bewässerung im Gefäß schneller auf das Wachstum auswirkt. Auch Paschold & Mayer (2006) stellten in Lysimeterversuchen fest, dass eine reduzierte Bewässerung die Faserwurzelmasse reduziert.

Der Wendepunkt der Wachstumsfunktion lag bei den bewässerten Varianten in einem vergleichbaren Bereich zwischen 2500 °Cd und 2600 °Cd. Bei den unbewässerten Varianten hingegen lag der Wendepunkt im Jahr 2006 bei 2300 °Cd und im Jahr 2007 bei 3300 °Cd. Dies entspricht den Zeitpunkten Ende Juli bzw. Mitte September. Dies lässt sich nur durch den unterschiedlichen Witterungsverlauf in den beiden Jahren erklären. Während im Jahr 2006 sehr viel Niederschlag im August fiel, wurde im Jahr 2007 die höhere Niederschlagssumme im Juli gemessen werden. So konnten die Pflanzen im August 2007 mehr Photosynthese betreiben, und dadurch stieg der Wasserbedarf an, der nur mit mehr Faserwurzeln gedeckt werden konnte.

EHLER & STÜTZEL (2005) stellten eine Zunahme der Wurzelanzahl bis Ende August fest. Allerdings standen deren Versuchspflanzen unter einem Dach, sodass der natürliche Niederschlag keinen Einfluss auf das Wachstum hatte.

4.6 Lagerungsdichte

Die Ergebnisse zur ermittelten Lagerungsdichte zeigen, dass die niedrigsten Lagerungsdichten in einer Bodentiefe von bis zu 15 cm vorliegen. Das entspricht einer Bodentiefe, die durch die Bodenbearbeitung erreicht wird. Durch die sehr große Anzahl an Bodenbearbeitungsmaßnahmen im Laufe eines Jahres in einer Spargelanlage, zuerst das Aufdämmen, nach dem Stechende das Abdämmen, dann die Tiefenlockerung zwischen den Reihen, dann das Einebnen des Zwischenreihenbereiches danach eine

erneute Bodenbearbeitung vor der Einsaat der Zwischenreihenbegrünung und abschließend eine Formung der Winterdämme (Anhang Tabelle 1 und Anhang Tabelle 2), wird der Boden in den oberen Bodenschichten sehr oft bearbeitet. Diese Arbeiten werden sowohl in der bewässerten als auch in der unbewässerten Variante durchgeführt. Nach SCHEFFER (2002) kann ein Boden umso mehr verdichtet werden, je höher der Bodenwassergehalt ist. Durch die Bewässerung ist der Boden in diesem Bodenbereich im Laufe der Vegetationsperiode immer ausreichend mit Wasser versorgt (Abbildung 7 bis Abbildung 9). In dieser Zeit wurde die Fläche im Jahr 2005 14-mal und im Jahr 2006 10-mal überfahren (ohne Düngemaßnahmen). Diese hohe Anzahl an Überfahrten des immer ausreichend mit Wasser versorgten Bodens führte sicherlich zu einer sehr hohen Verdichtung in den Tiefen 30 cm und 45 cm. In der unbewässerten Variante wurde die Fläche ebenso oft befahren. Ein trockener Boden lässt sich nicht so stark verdichten, sodass in der unbewässerten Variante der Boden nicht so stark verdichtet wird und die Lagerungsdichten daher geringer bleiben. Auch die Aussaat von Ölrettich zwischen den Reihen konnte die Bodenschichten nicht wieder auflockern, da in beiden Jahren der Ölrettich sowohl in der bewässerten als auch in der unbewässerten Variante sich nicht oder nur sehr unbefriedigend entwickelte.

Laut REIJMERINK (1973), ZIEGLER (2002), VAN DAM (1973) und VAN DAM et al. (1987) kommt es ab einem Widerstandswert von 30 kg cm^{-2} bei einer Penetrometermessung zu einem reduzierten Wurzelwachstum bei Spargel. Höherer Wassergehalt verringert den Bodenwiderstand, und damit auch den Penetrometer-Messwert, sodass Wurzeln trotz hoher Lagerungsdichte bei feuchtem Boden besser wachsen können als in trockenem Boden mit geringer Lagerungsdichte (BESTE 2005), da sie die Bodenpartikel einfacher gegeneinander verschieben können. Bei gleicher Lagerungsdichte nimmt der mechanische Widerstand mit abnehmender Bodenfeuchte zu (MARSCHNER 1995). Das reduziert wiederum das Wurzellängenwachstum. Vergleicht man die Durchwurzelung der bewässerten mit der unbewässerten Variante fällt auf, dass in der bewässerten Variante trotz höherer Lagerungsdichte in Bodentiefen unterhalb 15 cm deutlich mehr Speicher- und Faserwurzeln vorhanden sind als in der unbewässerten Variante. Somit können die Pflanzen in der bewässerten Variante trotz höherer Lagerungsdichte den Boden einfacher durchwurzeln als in der unbewässerten.

Laut NYE & TINKER (1977) wird das Wurzelwachstum ab Lagerungsdichten über $1,7 \text{ g/cm}^3$ reduziert oder eingestellt. Dieser Grenzwert wird in der bewässerten Variante in den Tiefen 30 cm und 45 cm erreicht, sodass davon ausgegangen werden kann, dass es zu einem eingeschränkten Wurzelwachstum in diesen Tiefen kommt. Auch WEINHEIMER & PASCHOLD (2007 b) beobachteten bei einer Lagerungsdichte oberhalb dieses Grenzwerts ein reduziertes Speicherwurzelwachstum.

4.7 Einfluss der Bewässerung auf die Reservekohlenhydratkonzentration

In den durchgeführten Gitterbox-Versuchen konnte kein Einfluss der Wassermenge auf die RKH-Konzentration nachgewiesen werden. Im Praxisversuch lag die RKH-Konzentration in der bewässerten Variante allerdings immer unter der Konzentration in der unbewässerten Variante. Dies konnte auch von PASCHOLD et al. (2007) in anderen Versuchen festgestellt werden. PRESSMAN et al. (1989) sowie ERNST & KRUG (1998) stellten hingegen fest, dass Trockenheit die Konzentration an RKH in den Speicherwurzeln senkt. Diese Versuche wurden allerdings in 10 L bzw. in 3,5 L-Gefäßen durchgeführt. PETERSON (2005) konnte keinen Einfluss der Bewässerung auf die RKH-Konzentration in Praxisversuchen feststellen. Auch PASCHOLD et al. (2005) konnten keinen Einfluss der Bewässerungsmenge auf die Konzentration an RKH nachweisen.

Der Verlauf der Brix-Werte und damit des RKH-Gehaltes weist in beiden Varianten des Praxisversuchs den bekannten Jahresverlauf auf (SHELTON & LACY 1980). Der höchste Gehalt liegt im Herbst direkt nach dem Absterben des Laubes vor. Während des Winters sinken die Messwerte, entweder durch Verlagerung an RKH ins Rhizom (WEINHEIMER & PASCHOLD 2007 a) oder durch Veratmung (MARTIN 1989). Im Frühjahr vor der Ernte liegen die Werte noch auf einem relativ hohen Niveau. Während der Erntephase und bis zum Entfalten der ersten Phyllokladien des Laubes sinken die Werte auf ein Minimum. Danach steigt der RKH-Gehalt wieder an, bis im Herbst das Maximum erreicht wird.

Berechnet man anhand der Speicherwurzeltrockenmassen und der Brix-Werte mit Formel 3 und Formel 4 die Gesamtmenge an RKH, wird deutlich, dass im Gitterbox-Versuch des Jahres 2006 in der feuchten Variante signifikant mehr RKH für die Bildung des nächstjährigen Ertrages vorhanden gewesen wären, als in der trockenen Variante.

Bei PASCHOLD & MAYER (2006) war in der Variante, die am meisten bewässert wurde nach der Ernte noch der höchste Gehalt an Reservestoffen nachweisbar.

Im Praxisversuch lag die Gesamtmenge an RKH in der bewässerten Variante immer über der Menge in der unbewässerten Teilfläche. Jedoch konnten bei den Frühjahrsterminen 2006 und 2007 keine signifikanten Unterschiede mehr nachgewiesen werden. In den vorangegangenen Herbst-Terminen war der Unterschied noch signifikant. PETERSON (2005) konnte beim Vergleich von bewässerten mit nicht bewässerten Pflanzen ebenfalls Unterschiede im Gesamtgehalt an RKH nachweisen.

Die höheren Konzentrationen an Reservekohlenhydraten in den Speicherwurzeln der unbewässerten Variante sind gleichbedeutend mit einer höheren Konzentration an Zuckern, da die Reservestoffe fast ausschließlich aus Glukose, Fruktose, Saccharose und Fruktanen bestehen. Diese höhere Konzentration bedeutet auch ein höheres osmotisches Potential in den Speicherwurzeln. Mit diesem höheren Potential passen sich Pflanzen an die Trockenheit an. Durch das höhere Potential kann mehr Wasser in den Zellen gespeichert werden.

Aufgrund der großen Streuung der Brix-Werte konnten keine signifikanten Unterschiede nachgewiesen werden. Von großen Streuungen berichtete auch ALDENHOFF (2004) bei Versuchen mit Spargeljungpflanzen. DOGRAS & ITSKOS (1991) berichten auch von einem Zusammenhang zwischen ethanollöslichen RKH und dem Trockensubstanzgehalt.

4.8 Verbrauch von RKH zur Bildung des Ertrages und des Aufwuchses

Im Gefäßversuch zur Ermittlung der Effektivität der Spargelpflanzen hinsichtlich der Bildung des Ertrages und des Aufwuchses wurde festgestellt, dass die Frischmasse der Speicherwurzeln in der Ernteperiode nahezu konstant bleibt. Lediglich die Trockenmasse geht zurück. Der Rückgang der Trockenmasse der gesamten unterirdischen Pflanzenteile wird dabei zu 90 % durch Trockenmasseverluste der Speicherwurzeln hervorgerufen. Die Trockenmasse fließt dabei lediglich zwischen 20 % und 35 % in die Bildung des Ertrages ein. Der Rest wird veratmet. MARTIN (1989) berechnete die Verluste an Zuckern während dieser Phase. Sie gibt an, dass zwischen

15 % und 50 % der Zucker veratmet bzw. in die Neubildung von Wurzeln investiert wird. Im vorliegenden Versuch wurden die Verluste für die Wurzelneubildung über die Berechnung der Trockenmassebilanz ausgeschlossen, sodass hier von reinen Verlusten durch Veratmung gesprochen werden kann.

Wendet man diese Ergebnisse auf die Berechnung der Trockenmassebilanz des Praxisversuchs an, so kommt man zu ähnlichen Ergebnissen. Die Vorgaben für die Berechnung lauten: Kein Verlust an Frischmasse der Speicherwurzeln während der Erntephase; der Verlust der Trockenmasse kommt zu 100 % aus den Speicherwurzeln; die Trockenmasse des Ertrages liegt bei 10 % (eigene Untersuchungen, Ergebnisse nicht dargestellt und HERRMANN 2001). Im Jahr 2006 wurden danach lediglich 26 % bzw. 28 % der Trockenmasse in Ertrag umgewandelt im Jahr 2007 ca. 32 % (Tabelle 36).

Tabelle 36: Berechnung der Effektivität der Spargelpflanzen zur Bildung des Ertrages

Variante	FM Speicherw.	TS Ernteende	TM vor der Ernte	TM Ernteende	Verlust TM	Ertrag je Pflanze	TM Ertrag	Effektivität %
2006 bewässert	3686	16,7	890	616	274	0,773	77,3	28,2
2006 unbewässert	2618	17,7	713	463	250	0,655	65,5	26,2
2007 bewässert	4600	17,5	1017	805	212	0,675	67,5	31,8
2007 unbewässert	2948	18,6	766	548	218	0,686	68,6	31,5

Diese Ergebnisse der Effektivität liegen in dem Bereich, der auch im Gefäßversuch festgestellt wurde. Daher ist festzustellen, dass die Spargelpflanzen während der Erntephase sehr viel Energie durch Veratmung verlieren. Diese Verluste sind von der Bodentemperatur abhängig. Die im Praxisversuch verwendete Verfrühungsmethode mit schwarz-weißer-Taschenfolie und darüber gespannten Minitunneln soll die Bodentemperatur erhöhen und dadurch den Frühertrag steigern. Die erhöhte Bodentemperatur führt neben der Steigerung des Ertrages allerdings auch zu einer erhöhten Aktivität der Kronen und damit auch zu einer Erhöhung der Veratmung.

PENNING DE VRIES et al. (1974) stellten bei Untersuchungen mit Mais fest, dass die Pflanzen aus 1,34 g Glukose und adäquaten Mengen an Stickstoff und sonstigen

Nährstoffen ein Gramm Trockenmasse aufbauen konnten. Würde man diese Zahlen für den Praxisversuch ansetzen, hätte die bewässerte Variante des Jahres 2006 ca. 30 t Rohertrag produzieren müssen. Die höchsten Erträge, die in Deutschland gemessen wurden lagen bei ca. 20 t/ha (LAUN et al. 2006). Allerdings sind von C₃-Pflanzen hohe Respirationsverluste bekannt (HARTMANN 1989), sodass die hohen Verluste nicht verwunderlich erscheinen, die nicht in die Trockenmasseproduktion eingehen.

5 Schlussfolgerungen

5.1 Empfehlungen für die weitere Forschung

In der vorliegenden Arbeit sollte der Einfluss der Bewässerung auf verschiedene Wurzelmerkmale von Spargel festgestellt werden. Da dies die erste Arbeit mit diesem Aufgabenschwerpunkt ist, konnten nicht alle Fragen geklärt werden.

Größeres Augenmerk sollte in Zukunft auf das Faserwurzelmerkmal gelegt werden. In der vorliegenden Arbeit konnte festgestellt werden, dass Spargel den Boden nur in einem sehr geringen Maße durchwurzelt. Dies erhöht die Gefahr, dass Nährstoffe ausgewaschen werden. Hier sollte vor allem geklärt werden, ob es möglich ist den Nährstoffeinsatz mit einer Tropfbewässerung zu reduzieren. Wenn auch die Untersuchungen zum Faserwurzelwachstum sehr arbeitsintensiv sind, sollte der Stichprobenumfang der Untersuchungen im Vergleich zur vorliegenden Arbeit vergrößert werden, um den großen Streuungen entgegenzuwirken.

Daneben sollte geklärt werden, welchen langfristigen Einfluss eine Bewässerung auf den Ertrag hat. Bislang liegen noch keine Ergebnisse vor, die beschreiben wie sich der Ertrag während der gesamten Standzeit einer Anlage verhält.

Die Untersuchungen zum RKH-Haushalt sollten fortgeführt werden. Vor allem unter der Zielstellung einer langfristigen Ertragsprognose. Auch sollte der Verlust an RKH während des Winters und während der Erntephase näher untersucht werden. Durch eine Reduktion dieser Verluste kann das Ertragspotential einer Anlage stark vergrößert werden. Somit wäre unter ökonomischen Gesichtspunkten der Spargelanbau deutlich vorteilhafter.

Um feststellen zu können, welches Alter Speicherwurzeln erreichen können, sollten mehrjährige Gitterbox-Versuche angelegt werden. Daneben sollte untersucht werden, unter welchen Anbaubedingungen Speicherwurzeln möglichst alt werden. Damit bliebe das Speichervolumen für RKH möglichst lange erhalten.

5.2 Empfehlungen für die Praxis

Die Untersuchungen zur Lagerungsdichte haben gezeigt, dass in der bewässerten Variante trotz des Einsatzes einer Tropfbewässerung der Boden in unmittelbarer Nähe zur Tropfleitung und in der Bodenschicht darunter sehr viel stärker verdichtet war als in der unbewässerten Variante. Dies lässt sich auf ein sehr häufiges Befahren der Anlage im Laufe einer Vegetationsperiode in Verbindung mit einem feuchten Boden zurückführen. Da sich ein feuchter Boden stärker verdichten lässt als ein trockener. Aus diesem Grund sollte beim Einsatz einer Bewässerung sehr großes Augenmerk auf die Bodenfeuchteverhältnisse beim Befahren einer Anlage gelegt werden. Wenn der Boden zu viel Wasser enthält, sollte auf ein Befahren der Anlage verzichtet werden. Vor dem Pflanzen sollte die Fläche hinsichtlich möglicher Bodenverdichtungen untersucht werden, da es nur vor dem Pflanzen möglich ist diese mittels mechanischer Lockerung zu beseitigen. Nur so können die Pflanzen bereits im Pflanzjahr tiefere Bodenschichten durchwurzeln, wozu sie nach den vorliegenden Versuchen fähig sind. Auch sollte im Pflanzjahr ein besonders großes Augenmerk auf die Bewässerung gelegt werden. Wie in den Versuchen nachgewiesen werden konnte entwickeln die gut mit Wasser versorgten Pflanzen einen wesentlich größeren Speicher in Form von einer größeren Speicherwurzelmasse. Neben dem größeren Speichervolumen bilden die gut bewässerten Pflanzen mehr Faserwurzeln, wodurch der Bodenvorrat an Wasser und Nährstoffen besser ausgenutzt wird.

Neben dem besseren Jungpflanzenwachstum fördert eine Bewässerung auch bei älteren Pflanzen das Speichervolumen für RKH. Durch dieses größere Speichervolumen können die Pflanzen nicht so schnell überstochen werden, wodurch die Alterung einer Anlage reduziert wird. Daneben haben die Untersuchungen auch gezeigt, dass eine Tiefenlockerung zwischen den Spargelreihen auch während der Standzeit einer Anlage möglich ist. Diese Maßnahme wirkt sich nicht nachteilig auf das Speicherwurzelwachstum der Pflanzen aus, da im Zwischenreihenbereich keine bzw. fast keine Speicherwurzeln vorhanden sind. Auch eine flache Bodenbearbeitung bis an die Pflanzreihen heran ist unbedenklich, da auch in diesem Bodenbereich nur sehr wenige Speicherwurzeln vorhanden sind.

Die Bewässerung fördert nicht nur das Speicherwurzelwachstum, sondern auch das Faserwurzelwachstum. Dies wurde in den vorliegenden Versuchen nachgewiesen. Durch das größere Faserwurzelwachstum können die Pflanzen den Boden besser durchwurzeln und die Bodenvorräte an Nährstoffen und Wasser besser erschließen. Nur dadurch kann sichergestellt werden, dass die Pflanzen die Nährstoffmengen, die mit einer Bodenanalyse nachgewiesen werden auch voll ausnutzen können. Aufgrund der Faserwurzelverteilung ist die Verwendung einer Tröpfchenbewässerung zur Bewässerung und auch zur Nährstoffversorgung als das geeignete Verfahren zu bewerten.

Die Untersuchungen zum RKH Haushalt haben gezeigt, dass eine einmalige Messung des RKH-Gehaltes keine genaue Aussage zum Status der Spargelanlage zulässt. Nur durch eine kontinuierliche Analyse des RKH-Gehaltes ist es möglich einzuschätzen auf welchem Niveau der Zuckergehalt einer Anlage liegt. Auch anhand des RKH-Gehaltes alleine ist noch keine Aussage zum Ertragspotential einer Anlage zu treffen. Nur in Verbindung mit der Wurzelmasse kann abgeschätzt werden welche Erträge eine Anlage erbringen kann.

5.3 Beurteilung der Arbeitshypothesen

1. Der Einfluss einer differenzierten Bewässerung auf das Triebwachstum und den zeitlichen Verlauf des Wachstums konnte nachgewiesen werden. Eine reduzierte Bewässerung in Gefäßversuchen hat eine signifikante Reduktion der Gesamtrieblänge zur Folge. In einem Praxisversuch konnte eine signifikante Verminderung der Stangenanzahl nachgewiesen werden, wenn keine Bewässerung erfolgte. Der Wachstumsverlauf während der Vegetationsperiode konnte nur in Gefäßversuchen ermittelt werden. Im Jahr 2006 zeigte sich kein Unterschied, im Jahr 2007 aber ein sehr starker Unterschied im Wachstumsverlauf.
2. Bei den Untersuchungen zum Einfluss der Bewässerung auf den Ertrag konnte die Hypothese nicht bestätigt werden. Dieses Ergebnis liegt an der zu kurzen Erntezeit auf der Praxisversuchsfläche.
3. Eine differenzierte Bewässerung hat einen Einfluss auf das Speicher- und Faserwurzelwachstum. Die Pflanzen im Praxisversuch zeigten sowohl beim Speicherwurzelwachstum als auch beim Faserwurzelwachstum deutliche

Unterschiede zwischen den bewässerten und den unbewässerten Parzellen. In Gefäßversuchen konnte ein signifikanter Unterschied des Wachstumsverlaufes nachgewiesen werden.

4. In den Gefäßversuchen konnte kein Einfluss der Bewässerung auf das Rhizomwachstum ermittelt werden. Dies widerspricht den Ergebnissen der Praxisversuche. Bei den Praxisversuchen handelte es sich um Mehrjährige Pflanzen, während in den Gefäßversuchen nur einjährige Pflanzen verwendet wurden.
5. Eine differenzierte Bewässerung hatte einen signifikanten Einfluss auf den Reservekohlenhydratgehalt und auf die Gesamtmenge an Reservekohlenhydraten. Zwar war in den bewässerten Pflanzen die Konzentration an RKH geringer. Aufgrund der größeren Wurzelmasse war aber die Gesamtmenge in diesen Pflanzen größer. In Gefäßversuchen konnte kein Einfluss auf die Konzentration nachgewiesen werden. Die Wurzelmasse und damit die Gesamtmenge an RKH war aber bei hoher Wasserversorgung größer.

6 Literaturverzeichnis

- ALDENHOFF, LUDGER (2004): Einfluss der Jungpflanzenqualität auf die Etablierung von Spargelanlagen. Dissertation Humboldt Universität zu Berlin.
- ANDERSON, E. L. (1988): Tillage and N fertilization effects on maize root growth and root : shoot ratio. *Plant and Soil*. 108, S. 245-251.
- ASSENG, S., RICHTER, C. AND G. WESSOLEK (1997): Modelling root growth of wheat as the linkage between crop and soil. *Plant and Soil*. 190, S.267-277.
- ATKINSON, D. (1990): Influence of root system morphology and development on the need for fertilisers and the efficiency of use. In: Balligar V. C.: Crops as enhancers of nutrient use. London, Academic Press, S. 411-451.
- BARBER, S. A. AND M. SILBERBUSH (1984): Plant root morphology and nutrient uptake. In: Barber, A. und D. R. Bouldin: Roots, nutrient and water influx and plan growth. Madison, WI, American society of Agronomy, S. 65-87.
- BARLEY, K.P. (1970): The configuration of the root system in relation to nutrient uptake. *Advances in Agronomy*. 22, S. 159-201.
- BASSOI, L. H., RESENDE, G. M., FLORI, J. E., SILVA, J. A. M. AND C. M. ALENCAR (2001): Root distribution of asparagus cultivars in irrigated areas of Petrolina, Brazil. *Horticultura Brasileira*. 19, 1, S. 17-24.
- BATTILINI, A. (1997): Response of asparagus (*Asparagus officinalis* L.) to post harvest irrigation. Proceedings of the 2nd International Symposium on Irrigation of horticultural Crops. *Acta Horticulturae* 449, S. 181-186.
- BAUER, T. (2000): Versuche zum Forschungsprojekt "Qualität Spargel (*Asparagus officinalis* L.) -hohle Stangen". Diplomarbeit FH Wiesbaden Standort Geisenheim.
- BEHR, HANS-CHRISTOPH (2005): International Asparagus Production and Markets. *Acta Horticulturae*. in Press.

- BENGOUGH, A.G. (2003): Root growth and function in relation to soil structure, composition and strength. In: de Kroon, Hans and Eric J. Visser: Root ecology. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag. S. 151-172.
- BERLINER, P. R. AND D. M. OOSTERHUIS (1987): Effect of root and water distribution in Lysimeters and in the field on the onset of crop water stress. Irrigation Science. 8, 4, S. 245-255.
- BESTE, ANDREA (2005): Landwirtschaftlicher Bodenschutz in der Praxis. Berlin, Verlag Dr. Köster.
- BLASBERG, C. H. (1932): Phases of the anatomy of *Asparagus officinalis*. Botanical Gazette. 94, S. 206-214
- BLOOM, PETRA (2003): Einfluss von Komposten auf Stickstoffdynamik und -haushalt, Wachstum und Ertrag von Spargel (*Asparagus officinalis* L.). Dissertation Universität Hannover.
- BÖHM, W. (1979): Methods of studying root systems. Springer Verlag Berlin Heidelberg New York.
- CAIRNS, ANDREW JOHN (1992): A reconsideration of fructan biosynthesis in storage roots of *Asparagus officinalis* L.. New Phytol.. 120, 2, S. 463-473.
- CALDWELL, M. M. (1987): Competition between root systems in natural communities. In: Gregory, P. J., Lake, J. V. and D. A. Rose: Root development and function. Cambridge, Cambridge University Press, S. 167-185.
- CALDWELL, M. M. AND J. H. RICHARDS (1986): Competing root systems: morphology and models of absorption. In: Givnish, T. J.: On the economy of plant form and function. Cambridge, London, New York, New Rochelle, Melbourne, Sydney, Cambridge University Press, S. 251-273.
- CALDWELL, M. M. AND J. H. RICHARDS (1989): Hydraulic lift: water efflux from upper roots effectiveness of water uptake by deep roots. Oecologia. 79, S. 1-5.

- CAMPBELL, J. M., BAUER, L. L., FAHEY, G. C., HOGARTH, A. J. C. L., WOLF, B. W. AND D. E. HUNTER (1997): Selected fructo-oligosaccharide (1-Kestose, Nystose and 1^F-β-fructofuranosylnystose) composition of foods and feeds. J. Agric. Food Chem.. 45, S. 3076-3082.
- CANNEL, G. H. AND F. H. TAKATORI (1970): Irrigation-Nitrogen studies in asparagus and measurement of soil moisture by the neutron method. Soil. Sci. Soc. Amer. Proc.. 34, S. 501-506.
- CLAASSEN, NORBERT (1990): Nährstoffaufnahme höherer Pflanzen aus dem Boden. Göttingen, Severin Verlag Göttingen.
- CLINE, R. A. (1969): The Effect of irrigation, organic amendments, time and rate of nitrogen applications on asparagus yields and tissue nutrient composition. Report. Hort. Res. Ontario. S. 10-16.
- CRÜGER, G., BACKHAUS, G. F., HOMMES, M., SMOLKA, S. UND H.-J. VETTEN (2002): Pflanzenschutz im Gemüsebau. Stuttgart (Hohenheim), Verlag Eugen Ulmer.
- DE SILVA, H. N., HALL, A. J., TUSTIN, S. AND P. W. GANDAR (1999): Analysis of Distribution of Root Length Density of Apple Trees on Different Dwarfing Rootstocks. Annals of Botany. 83, S. 335-345.
- DEAN, B. B. (1996): Asparagus yield cycles and heat unit correlations. HortScience. 31, S.586.
- DOGRAS C. AND A. ITSKOS (1991): Seasonal changes of dry matter and carbohydrates in storage roots of asparagus. Adv. Hort. Sci.. 6, S. 74-76.
- DOWNTON, W. J. S. AND E. TÖRÖFALVY (1975): Photosynthesis in developing asparagus plants. J. Plant. Physiol.. 1, S. 367-375.
- DROST, D. T. (1994): Water stress reduces asparagus growth. HortScience. 29, S. 531.
- DROST, D.T. (1996): Irrigation budget and plant growth of asparagus. *Acta Horticulturae* 415, S. 343-350.
- DROST, D.T. (1997): Asparagus. In: Wien, H.C.: The Physiology of Vegetable Crops. Wallingford, New York, CAB International, S. 621-651.

- DROST, D.T. (1999a): Irrigation Effects on Asparagus Root Distribution. *Acta Horticulturae*. 479, S. 283-288.
- DROST, D.T. (1999b): Soil water deficits reduce growth and yield of asparagus. *Acta Hort* 479. S. 383-390.
- DROST, D.T. (2007): Auf das Wurzelsystem achten! *Gemüse*. 43, 4, S. 29-32.
- DROST D. T. AND D. WILCOX-LEE (1990): Effect of soil Matric Potential on Growth and Physiological Responses of Greenhouse Grown Asparagus. *Acta Horticulturae* 271, S. 467-476.
- DROST, D. T. AND D. WILCOX-LEE (1997a): Soil water deficits and asparagus: I. Shoot, root and bud growth during two seasons. *Scientia Horticulturae*. 70, S. 131-143.
- DROST, D.T. AND D. WILCOX-LEE (1997b): Soil water deficits and asparagus: II. Bud size and subsequent spear growth. *Scientia Horticulturae*. 70, S. 145-153,
- DROST, D. T. AND D. WILCOX-LEE (2000): Tillage alters root distribution in a mature asparagus planting. *Scientia Horticulturae*. 83, S. 187-204.
- DROST, D. AND D. WILSON (2002): Estimating root length density and biomass in asparagus. *Acta Horticulturae* 589. S. 287-295.
- DROST, D. AND D. WILSON (2003): Monitoring root length density and root biomass in asparagus (*Asparagus officinalis*) with soil cores. *New Zealand Journal of crops and Horticultural Science*. 31, S. 125-137.
- DUFAULT R. J. (1996): Relationships between soil temperature and spring asparagus spear emergence in costal South Carolina. *Acta Horticulturae* 415. S. 157-161.
- DUFAULT, R. J. AND B. WARD (2005): Impact of cutting pressure on yield, quality, root carbohydrates and survival of spring-harvested or summer-forced asparagus. *HortScience*. 40, 5, S. 1327-1332.
- DWD (2007): Mündliche Mitteilung Deutscher Wetterdienst, Außenstelle Geisenheim, vom 05.12.2007.
- EHLER, I. UND H. STÜTZEL (2005): Einfluss von unterfluriger Tropfbewässerung auf Morphologie und Physiologie von Spargel.. *BHGL Schriftenreihe* . 23, S. 47.

- EHLERS, WILFRIED (1996): Wasser in Boden und Pflanze: Dynamik des Wasserhaushalts als Grundlage von Pflanzenwachstum und Ertrag.. Stuttgart, Ulmer Verlag.
- EISSENSTAT, DAVID M. (1992): Costs and benefits of constructing roots of small diameter. *Journal of Plant Nutrition*. 15, 6&7, S. 763-782.
- ELLISON, J. H., D. F., SCHEER AND J. J. WAGNER (1959): Asparagus yield as related to plant vigor, earliness and sex. *Proceedings of the American Society for Horticultural Science*. 75, S. 411-415.
- ELLISON, J. H., G. B., REYNARD, D. F., SCHEER AND J. J. WAGNER (1960): Estimating comparative yields of asparagus strains without full season harvest records. *Proceedings of the American Society for Horticultural Science*. 76, S. 367-381.
- ELLISON, J.H. AND D. F. SCHEER (1959): Yield related to brush vigour in asparagus. *Proceedings of the American Society for Horticultural Science* 75, S. 339-344.
- EMMERICH, SUSANNE (2002): Die Feinwurzelsysteme von vier tropischen Nutzbäumen, ihre Nährstoffaufnahme und ihre Interaktionen in einer agroforstlichen Mischkultur in Zentral-Amazonien. Dissertation Universität Düsseldorf.
- ERNST, M. AND H. KRUG (1998): Seasonal Growth and development of asparagus (*Asparagus officinalis* L.). III. The effect of temperature and water stress on the carbohydrate content in storage roots and rhizome buds. *Gartenbauwissenschaft*. 63, 5, S. 202-208.
- FELLER, CARMEN AND MATTHIAS FINK (2007): Refraction as a measure of soluble carbohydrates in storage roots of asparagus. *HortScience*, 42, 1, S. 57-60.
- GILLISPIE, A. R. (1989): Modelling nutrient flux and interspecies root competition in agro forestry interplantings. *Agroforestry Systems*, 8, S. 257-265.
- GREENWOOD, D. J., GERWITZ, A., STONE, D. A. AND BARNES, A. (1982): Root development of vegetable crops. *Plant and Soil*, 68, S. 75-96.
- HANNA, G. C. AND L. D. DONEEN (1958): Asparagus irrigation studies. *Cal. Agri.*, 12, S. 8-15.

- HARTMANN, H. D. (1981): Die Bewässerung bei Spargel und ihre Auswirkung auf die Pflanze. *Archiv Gartenbau*, 29, 4, S. 167-175.
- HARTMANN, H. D. (1989): Spargel. Grundlagen für den Anbau. Stuttgart, Verlag Eugen Ulmer.
- HARTMANN, H. D. (1998): Wasseraufnahme beim Spargel. *Monatsschrift*, 8, S. 576-577.
- HAYNES, R. J. (1987): Accumulation of dry matter and changes in storage carbohydrate and amino acid content in the first two years of asparagus growth. *Sci. Hort.*, 32, S. 17-23.
- HEIßNER, A., SCHMIDT, S., SCHONHOF, I., FELLER, C. AND M. SCHREINER (2006): Spear yield and quality of white asparagus as affected by soil temperature. *European Journal of Agronomy*, 25, S. 336-344.
- HERRMANN, KARL (2001): Inhaltsstoffe von Obst und Gemüse. Stuttgart (Hohenheim): Ulmer Verlag.
- HOOGENBOOM, G., HUCK, M. G. AND C. M. PETERSON (1987): Root growth rate of soybean as affected by drought stress. *Agronomy Journal*, 79, S. 607-614.
- HUTCHINGS, M. J. AND E. A. JOHN (2003): Distribution of roots in soil, and root foraging activity. In: de Kroon Hans and Eric J. W. Visser: *Root Ecology*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag. S. 33-60.
- KAGE, H., KOCHLER, M. AND H. STÜTZEL (2004): Root growth and dry matter partitioning of cauliflower under drought stress conditions: measurement and simulation. *European Journal of Agronomy*, 20, S. 379-394.
- KAGE, HENNING AND WILFRIED EHLERS (1996): Does transport of water to roots limit water uptake of field crops? *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 159, S. 583-590.
- KAUFMANN, F. (1977): Intensivierung der Spargelproduktion durch Bewässerung. *Gartenbau*, 24, S. 73-74.

- KIM Y.S. AND R. SAKIYAMA (1989): Changes in carbohydrates of asparagus storage roots on sprouting. *Journal of the Japanese Society of Horticulture Science*, 38, 2, S. 383-390.
- KOCH MICHAEL (2007): Die kleine Marktstudie: Spargel. *Gemüse*, 40, 5, S. 46-49.
- KRETSCHMER M. AND H. D. HARTMANN (1979): Experiments in apical dominance with *Asparagus officinalis* L. *Proceedings of the 5th International Asparagus-Symposium*, S. 214-221.
- KRUG H. (1996): Seasonal Growth and Development of *Asparagus* (*Asparagus officinalis* L.) I. Temperature Experiments in controlled environments. *Gartenbauwissenschaft*, 61, 1, S. 18-25.
- KRUG H. (1997): Environmental Influences on Development, Growth and Yield. In: Wien H. C.: *The physiology of vegetable crops*. Wallingford, UK: Cab International. S. 101-180.
- KRUG H. (1998): Seasonal Growth and Development of *Asparagus* (*Asparagus officinalis* L.) II. Influence of Drought on crown activity. *Gartenbauwissenschaft*, 63, 2, S. 71-78.
- KRUG H. (1999a): Seasonal Growth and Development of *Asparagus* (*Asparagus officinalis* L.) IV. Crown activity as a function of incubation temperature and temperature gradient. *Gartenbauwissenschaft*, 64, 2, S. 84-88.
- KRUG H. (1999b): Seasonal Growth and Development of *Asparagus* (*Asparagus officinalis* L.) V. Fern "ripenig" and crown activity in open fields. *Gartenbauwissenschaft*, 64, 4, S. 165-172.
- KRUG, H., LIEBIG, H.-P. UND H. STÜTZEL (2002): *Gemüseproduktion*. Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer.
- KRUG, HELMUT UND DIETER KAILUWEIT (1999): Gefährdet Spargelanbau die Umwelt? Stickstoffhaushalt von Spargel. *Gemüse*, 35, 7, S. 433-436.
- KUNZELMANN, GERALD (1998): Möglichkeiten zur effizienten Bewässerung und Bewässerungssteuerung bei ausgewählten Freilandgemüsearten sowie bei Zuckerrüben und Mais. *Dissertation Universität Gießen*.

- KUTSCHERA, LORE (1960): Wurzelatlas mitteleuropäischer Ackerunkräuter und Kulturpflanzen. Frankfurt am Main: DLG-Verlag.
- KUTSCHERA, LORE UND ERWIN LICHTENEGGER (2002): Wurzelatlas Mitteleuropäischer Waldbäume und Sträucher. Graz: Stocker-Verlag.
- LAMPERT, E. P., JOHNSON, D. T., TAI, A. W., KILPATRICK, G., ANTOSIAK, R. A., CROWLEY, P. H. AND E. D. GOODMAN (1980): A Computer Simulation to maximize Asparagus Yield. J. Amer. Soc. Hort. Sci., 105, 1, S. 37-42.
- LAUN, N., HIMMEL, M., PASCHOLD, P.-J. UND WEINHEIMER, S. (2006): Schäden in der Laubabreife beeinträchtigen den Spargelertrag des Folgejahres. Versuche im Deutschen Gartenbau -Gemüsebau-.
- LEDGARD, S. F., DOUGLAS, J. A., FOLLETT, J. M. AND M. S. SPROSEN (1992): Influence of time on the utilization of nitrogen fertilizer by asparagus, estimated using ¹⁵N. Plant and Soil, 147, S. 41-47.
- LIEBIG, H.-P. UND WIEBE H.-J. (1982): Kurzfristige Ertragsprognosen von Bleichspargel. Gartenbauwissenschaft, 47, S. 91-96.
- MARSCHNER, H. (1995): Mineral Nutrition of Higher Plants. London San Diego New York Boston Sydney Tokyo Toronto: Academic Press.
- MARTIN, SUSANNE (1989): Untersuchungen über den Kohlenhydratstoffwechsel von Spargel (*Asparagus officinalis* L.) in Abhängigkeit von der jahreszeitlichen Entwicklung der Pflanze. Dissertation Universität Hohenheim.
- MAX, JOHANNES (2004): Einfluß von N-Düngung und Bodenbearbeitung auf Wurzelwachstumsgedynamik, ¹⁴C-Assimilatverteilung und Rhizodeposition von Winterraps (*Brassica napus* L.). Dissertation Universität Kiel.
- MAYER, NORBERT (2007): mündliche Mitteilung vom 23.10.2007. FA Geisenheim.
- MAYER, NORBERT UND PETER-JÜRGEN PASCHOLD (2007): Trockenstress bei Spargel mit Dendrometern erfassen. BHGL-Schriftenreihe 2007 S. 98
- MEUSEL, H., JÄGER, E., RAUSCHERT, S. UND WEINERT, E. (1965): Vergleichende Chronologie der zentraleuropäischen Flora. Jena. VEB Gustav Fischer Verlag.

- MOON, D.M. (1976): Yield potential of *Asparagus officinalis* L. New Zealand Journal of Experimental Agriculture, 4, S. 435-438.
- NELSON, C. J. AND W. G. SPOLLEN (1987): Fructans. Physiol. Plant., 71, S. 512-516.
- NICHOLS, M.A. AND D.J. WOOLLEY (1985): Growth studies with asparagus. Proceedings of the 6th International Asparagus-Symposium. S. 287-297.
- NILSSON, U., DAHLQUIST, A. UND B. NILSSON (1986): Cereal fructans: Part 2 - Characterization and structure of wheat fructosans. Food Chem., 22, S. 95-106.
- NYE P. H. AND P. B. TINKER (1977): Solute movement in the soil-root system. Oxford, London, Edinburgh, Melbourne: Blackwell Scientific Publications.
- PALESE, A. M., NUZZO, V., DICHIO, B., CELANO, G., ROMANO, M. AND C. XILOYANNIS (2000): The influence of soil water content on root density in young olive trees. *Acta Horticulturae* 537, S. 329-336.
- PASCHOLD, P.-J., ARTELT, B. UND G. HERRMANN (2002): Kohlenhydratgehalte von Spargel als Basis für Betriebsentscheidungen. Gemüse, 38, 12, S. 30-32.
- PASCHOLD, P.-J., WEINHEIMER, S., ARSLAN, A., SCHÄFER, R. AND M. ERNST (2005): Recommendation for growers on the basis of carbohydrates in asparagus roots- Description of the online system Germany. *Acta Horticulturae*, in Press.
- PASCHOLD, P.-J., ARTELT, B. UND HERRMANN, G. (2007): Einfluss von Tropfbewässerung und Kompost auf den Ertrag von Spargel. Versuche im Deutschen Gartenbau-Gemüsebau-.
- PASCHOLD, P.-J. UND N. MAYER (2006): Wasserbedarf von Spargel im Lysimeter. BHGL – Schriftreihe, Band 24, S. 185.
- PASCHOLD, P.-J. UND K. EIMERT (2007): Spargel zählt botanisch nicht mehr zu den Liliengewächsen. Gemüse, 43, 12, S. 35.
- PENNING DE VRIES, F. W. T., BRUNSTING, A. H. M. AND H. H. VAN LARS (1974): Products, requirements and efficiency of biosynthesis: A quantitative approach. J. theor. Biol., 45, S. 339-377.

- PETERSON, R. S. (2005): Evaluating asparagus productivity by assessing farm practices, irrigation methods and harvest pressure. Master Thesis, Utah state university.
- PIEPENBROCK, WOLFGANG (2002): Untersuchungen zum Einfluss der Bewässerung und Bewässerungssteuerung auf Ertrag und Qualität bei Spargel. Dissertation Universität Hohenheim.
- POLLOCK, C. J. AND A. J. CRAINS (1991): Fructan metabolism in grasses and cereals. *Ann. Rev. Plant. Physiol. Plant Mol. Biol.*, 42, S. 77-101.
- PONTIS, H. G. (1971): Sobre el metabolismo de los polimeros de fructosa. *An. Sco. Cient. Argent. Sspl.*, S. 59-63.
- PONTIS, H. G. (1990): Fructans. *Meth. Plant Biochem.*, 2, S. 353-369.
- PRESSMAN, E., SCHAEFER, A. A., COMPTON, D. AND E. ZAMSKI (1989): The effect of low temperature and drought on the carbohydrate content of asparagus. *Plant Physiol.*, 134, S. 109-213.
- R (2006): A language and environment for statistical computing. R Development Core Team, R Foundation for statistical Computing, Vienna, Austria.
- REIJMERINK, A. (1973): Microstructure, soil strength and root development of asparagus on loamy sands in the Netherlands. *Neth. J. agric. Sci.*, 21, S. 21-43.
- ROBB, A. (1984): Physiology of Asparagus (*Asparagus officinalis* L.) as related to the Production of the Crop. *New Zealand Journal of experimental Agriculture*, 12, S. 251-260.
- ROTH, R. L. AND B. R. GARDNER (1989): Asparagus yield response to water and nitrogen. *Trans. Amer. Soc. Agric. Engr.*, 32, S. 105-112.
- ROTH, R. L. AND B. R. GARDNER (1990): Asparagus spear size distribution and earliness as affected by water and nitrogen applications. *Trans. Amer. Soc. Agric. Engr.*, 33, S. 480-486.
- SANDERS, DOUGLAS C. (1985): Influence of extended harvest duration on carbohydrate accumulation and yield of established asparagus. *Proceedings of the 6th International Asparagus-Symposium*, S. 333-337.

- SAWADA, E., YAKUWA, T. AND S. IMAKAWA (1962): On the assimilation of asparagus ferns. XVI. Int. Hort. Congress Vol. II, S. 479-483.
- SCHALLER, J. UND P.-J. PASCHOLD (2007): Stomatamorphologie und -verteilung als Unterscheidungsmerkmal für Trockenstress-Anfälligkeit bei Spargelsorten. BHGL - Schriftreihe, *Band 25*, S. 96
- SCHEFFER, FRITZ (2002): Lehrbuch der Bodenkunde. 15. Auflage. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- SCOTT, L. E. (1954): Carbohydrate reserves of asparagus crowns. Bul. Del. St. Bd. Agr., 44.
- SCOTT, L. E., MITCHELL, J. H. AND R. A. MCGRINTY (1929): Effects of certain treatments on the carbohydrate reserves of asparagus crowns. South Carolina Agriculture Experiment Station Bulletin. 321.
- SHELTON, D. R. UND M. L. LACY (1980): Effect of harvest duration on yield and on depletion of storage carbohydrates in asparagus roots J. Amer. Soc. Hort. Sci., 105, 3, S. 332-335.
- SHIOMI, NORIO (1993): Structure of fructopolysaccharide (asparagosin) from roots of asparagus (*Asparagus officinalis* L.). New Phytol., 123, S. 263-270.
- SHIOMI, N., YAMADA, J. AND M. IZAWA (1976): Isolation and identification of fructo-oligosaccharides in roots of asparagus (*Asparagus officinalis* L.). Agr. Biol. Chem., 40, 3, S. 567-575.
- SIOMOS, S. ANASTASIOS AND DIMITRA G. PONTIKIDOU (2000): Seasonal changes of dry matter and sugars in the fleshy roots of asparagus seedlings. Journal of vegetable crop production, 6, 1, S. 45-52.
- SMIT, A. L., BENGOUGH, A. G., ENGELS, C., VAN NOORDWIJK, M., PELLERIN, S. UND S. C. VAN DE GEIN (2000): Root methods. A handbook. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- STERRETT, S. B., ROSS, B. B. AND C. P. SAVAGE (1990): Establishment and Yield of Asparagus as Influenced by Planting and Irrigation Method. J. Amer. Soc. Hort. Sci., S. 26-33.

- STERRETT, S.B., ROSS, B.B. AND C. P. SAVAGE (1989): Influence of irrigation method on establishment and yield of asparagus crowns and transplants. *The Vegetable grower's news.*, 44, 3, S. 1-2.
- SUZUKI, MICHIO (1993): Fructans in crop production and preservation. In: Suzuki, M. and N. J. Chatterton: *Science and Technology of Fructans*. Boca Raton, Ann Arbor, London, Tokyo: CRC Press, Inc., S. 227-256.
- TAGA, T., YAMABUKI, K., IWABUCHI, H. AND S. SATO (1980): Analysis of cultivation environments on the growth of asparagus: 1. effects of harvesting term on the yields and the carbohydrate in the stock root. *The Bulletin of Hokkaido Prefectural Agricultural Experiment Stations.*, 43, S. 63-71.
- TENNANT, D. (1975): A test of modified line intersect method of estimating root length. *J. Ecol.*, 63, S. 995-1001.
- VAN DAM, J. G. C., J. A. HULSHOF AND CH. TH. SCHLANGEN (1987): De invloed van diepe grondbewerking op de opbrengsten van asperge in een veldpodzolgrond. *Cultuurtechnisch Tijdschrift*, 26, 4, S. 275-284.
- VAN DAM, J. G. C. AND J. A. HULSHOF (1973): Bodemgeschiktheidsonderzoek, in het bijzonder bij asperges, apples en stocktomaten. Sticht. Bodenkart. Wageningen.
- VELTEN, K., PASCHOLD, P.J. AND U. RIECKMANN (2004): Analysis of the Subsurface Growth of White Asparagus. *Acta Horticulturae* 654, S. 97-104.
- VOGEL GEORG (1996): *Handbuch des speziellen Gemüsebaus*. Stuttgart: Eugen Ulmer Verlag.
- WALTER, H. (1979): *Vegetations- und Klimazonen*. Stuttgart: Eugen Ulmer Verlag.
- WEAVER, J. E. (1926): *Root development of field crops*. 1. Auflage. New York: McGraw-Hill Book Company.
- WEAVER, J. E. AND W. E. BRUNER (1927): *Root development of vegetable crops*. 1. Auflage. New York: McGraw-Hill Book Company.
- WEINHEIMER, S. UND P.-J. PASCHOLD (2007a): Verluste von Reservekohlenhydraten im Winter? Versuche im Deutschen Gartenbau -Gemüsebau 2007-.

- WEINHEIMER, S. UND P.-J. PASCHOLD (2007b): Wurzelwachstum und -verteilung bei Spargel Gemüse, 43, 8, S. 35-37.
- WILCOX, DARLENE (1985): Relationship between soil matric potential, fern xylem potential and growth of asparagus. Proceedings of the 6th International Asparagus-Symposium. S. 277-286.
- WILCOX-LEE, DARLENE (1987): Soil matric potential, plant water relations and growth in asparagus. HortScience, 22, 1, S. 22-24.
- WILCOX-LEE, DARLENE AND DANIEL T. DROST (1990): Effect of Soil Moisture on Growth, Water Relations and Photosynthesis in an open Pollinated and Male Hybrid Asparagus Cultivar. Acta Horticulturae 271, S. 457-465.
- WILSON, D. R. (2002): AspireNZ: A Decision Support System for Managing Root Carbohydrate in Asparagus. Acta Horticulturae 589, S. 51-55.
- WILSON, D. R., C. G. CLOUGHLEY, P. D. JAMIESON AND S. M. SINTON (2002): A Model of Asparagus Growth Physiology. Acta Horticulturae 589, S. 297-301.
- WILSON, D. R., SINTON, S. M. AND C. E. WRIGHT (1999): Influence of time of spear harvest on root system resources during the annual growth cycle of asparagus. Acta Horticulturae 479, S. 313-319.
- WILSON, D.R., CLOUGHLEY, C. G. AND SINTON, S. M. (1999): Model of the influence of temperature on the elongation rate of asparagus spears. Acta Horticulturae 479, S. 297-304.
- WILSON, D., CLOUGHLEY, C. G. UND S. M. SINTON (2002): AspireNZ: A decision support system for managing root carbohydrate in asparagus. Acta Horticulturae 589, S. 51-55.
- WILSON D., SINTON, S., BUTLER, R., DROST, D., PASCHOLD, P.-J., VAN KRUISTUM, G., POLL, J., GARCIN, C., PERTIERRA, R., VIDAL, I. AND K. GREEN (2005): Carbohydrates and Yield Physiology of Asparagus. A Global Overview. Acta Horticulturae, In Press.

- WOOLLEY KARNÖ UND D. J. WOOLLEY (2002): Studies on remobilization of fructans from asparagus roots during harvest using carbon-14 and high performance liquid chromatography. *Acta Horticulturae* 589, S. 273-279.
- YAKUWA, T., HARADA, T., TAKAHASHI, Y., TAMURA, H., YAMAYA, K., OHYANE, T., SATO, S., MINAGAWA, Y., AND K. YAMAKAWA (1982): Studies on the Botanical Characteristics of Asparagus Plant: III. Observation on the root system of 12-year-old plants by "Soil blocking method". *Memoirs of the Faculty of Agriculture - Hokkaido University (Japan)*, S. 433-440.
- YANGGYU, KU, D. J. WOOLLEY AND M. A. NICHOLS (2005): Effect of chilling duration and temperature on asparagus spear growth rate. *Acta Horticulturae*, In Press.
- YEN, YUNG-FU (1993): Growth and Physiological responses of asparagus (*Asparagus officinalis* L.) at high temperatures. Doctoral Thesis Massey University.
- YEN, Y., M.A. NICHOLS, D.J. WOOLLEY (1996): Growth of asparagus spears and ferns at high temperatures. *Acta Horticulturae* 415, S. 163-174.
- YOUNG, A. (1989): *Agroforestry for Soil Conservation*. Wallingford: BBC Wheatons Ltd.
- ZIEGLER, J. (2002): *Bleichspargelanbau*. Neustadter Hefte 101. Verein der Absolventen - Gartenbau- der SLFA Neustadt a.d.W. 4. Auflage. Neustadt a.d.W.

Anhang

Anhang Abbildung 1: Verlauf der Monatsmitteltemperatur und der Monatssumme der Niederschläge sowohl des langjährigen Mittels (1971-2000) als auch im Versuchsjahr 2007. Wetterstation Karlsruhe (Quelle DWD 2007).....	132
Anhang Abbildung 2: Verlauf der Monatsmitteltemperatur und der Monatssumme der Niederschläge sowohl des langjährigen Mittels (1971-2000) als auch im Versuchsjahr 2006. Wetterstation Karlsruhe (Quelle DWD 2007).....	132
Anhang Abbildung 3: Verlauf der Monatsmitteltemperatur und der Monatssumme der Niederschläge sowohl des langjährigen Mittels (1971-2000) als auch im Versuchsjahr 2005. Wetterstation Karlsruhe (Quelle DWD 2007).....	133
Anhang Abbildung 4: Verteilung der Speicherwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der bewässerten Variante Ende März 2005 im Praxisversuch.	133
Anhang Abbildung 5: Verteilung der Speicherwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der bewässerten Variante Ende Mai 2005 im Praxisversuch.	134
Anhang Abbildung 6: Verteilung der Speicherwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der bewässerten Variante Ende Juni 2005 im Praxisversuch.	134
Anhang Abbildung 7: Verteilung der Speicherwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der bewässerten Variante Ende Juli 2005 im Praxisversuch.	135
Anhang Abbildung 8: Verteilung der Speicherwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der bewässerten Variante Ende August 2005 im Praxisversuch.	135
Anhang Abbildung 9: Verteilung der Speicherwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der bewässerten Variante Ende Oktober 2005 im Praxisversuch.....	136
Anhang Abbildung 10: Verteilung der Speicherwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der unbewässerten Variante Ende März 2005 im Praxisversuch.	136
Anhang Abbildung 11: Verteilung der Speicherwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der unbewässerten Variante Ende Mai 2005 im Praxisversuch.	137
Anhang Abbildung 12: Verteilung der Speicherwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der unbewässerten Variante Ende Juni 2005 im Praxisversuch.	137
Anhang Abbildung 13: Verteilung der Speicherwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der unbewässerten Variante Ende August 2005 im Praxisversuch.	138
Anhang Abbildung 14: Verteilung der Speicherwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der unbewässerten Variante Ende Oktober 2005 im Praxisversuch.....	138
Anhang Abbildung 15: Verteilung der Speicherwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der bewässerten Variante Ende März 2006 im Praxisversuch.	139
Anhang Abbildung 16: Verteilung der Speicherwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der bewässerten Variante Ende Mai 2006 im Praxisversuch.	139

Anhang Abbildung 17: Verteilung der Speicherwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der bewässerten Variante Ende Juli 2006 im Praxisversuch.	140
Anhang Abbildung 18: Verteilung der Speicherwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der bewässerten Variante Ende August 2006 im Praxisversuch.	140
Anhang Abbildung 19: Verteilung der Speicherwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der bewässerten Variante Ende Oktober 2006 im Praxisversuch.	141
Anhang Abbildung 20: Verteilung der Speicherwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der unbewässerten Variante Ende März 2006 im Praxisversuch.	141
Anhang Abbildung 21: Verteilung der Speicherwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der unbewässerten Variante Ende Mai 2006 im Praxisversuch.	142
Anhang Abbildung 22: Verteilung der Speicherwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der unbewässerten Variante Ende August 2006 im Praxisversuch.	142
Anhang Abbildung 23: Verteilung der Speicherwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der unbewässerten Variante Ende Oktober 2006 im Praxisversuch.	143
Anhang Abbildung 24: Verteilung der Faserwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der bewässerten Variante Ende März 2005 im Praxisversuch.	143
Anhang Abbildung 25: Verteilung der Faserwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der bewässerten Variante Ende Mai 2005 im Praxisversuch.	144
Anhang Abbildung 26: Verteilung der Faserwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der bewässerten Variante Ende Juni 2005 im Praxisversuch.	144
Anhang Abbildung 27: Verteilung der Faserwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der bewässerten Variante Ende Juli 2005 im Praxisversuch.	145
Anhang Abbildung 28: Verteilung der Faserwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der bewässerten Variante Ende August 2005 im Praxisversuch.	145
Anhang Abbildung 29: Verteilung der Faserwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der bewässerten Variante Ende Oktober 2005 im Praxisversuch.	146
Anhang Abbildung 30: Verteilung der Faserwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der unbewässerten Variante Ende März 2005 im Praxisversuch.	146
Anhang Abbildung 31: Verteilung der Faserwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der unbewässerten Variante Ende Mai 2005 im Praxisversuch.	147
Anhang Abbildung 32: Verteilung der Faserwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der unbewässerten Variante Ende Juni 2005 im Praxisversuch.	147
Anhang Abbildung 33: Verteilung der Faserwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der unbewässerten Variante Ende August 2005 im Praxisversuch.	148
Anhang Abbildung 34: Verteilung der Faserwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der unbewässerten Variante Ende Oktober 2005 im Praxisversuch.	148

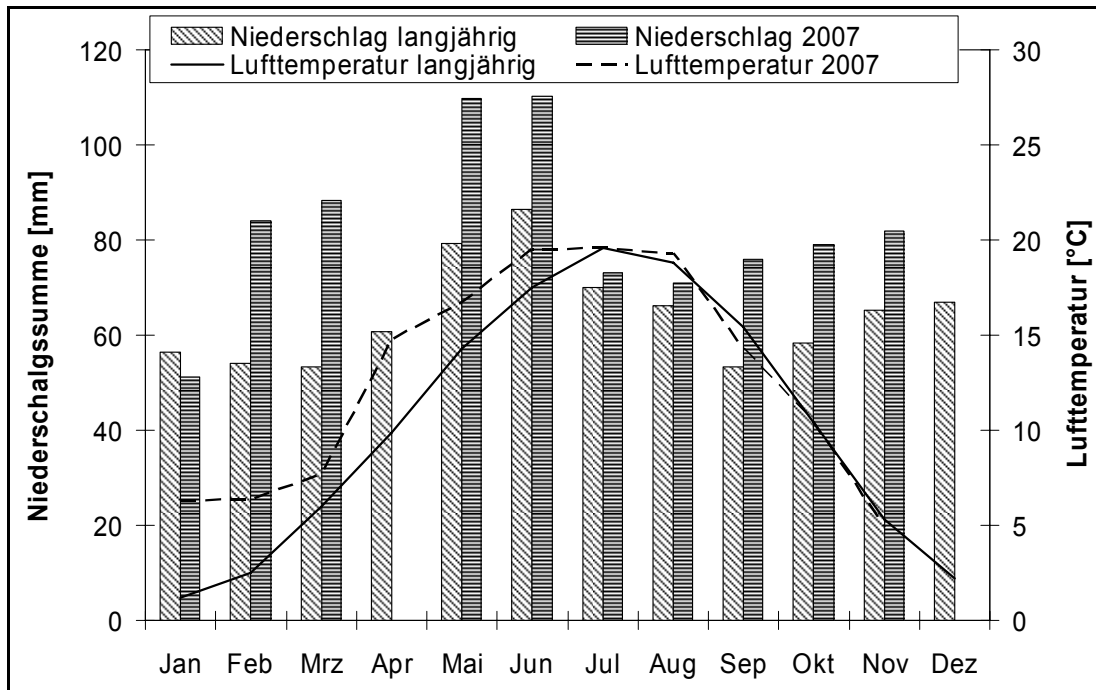
Anhang Abbildung 35: Verteilung der Faserwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der bewässerten Variante Ende März 2006 im Praxisversuch.	149
Anhang Abbildung 36: Verteilung der Faserwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der bewässerten Variante Ende Mai 2006 im Praxisversuch.	149
Anhang Abbildung 37: Verteilung der Faserwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der bewässerten Variante Ende Juli 2006 im Praxisversuch.	150
Anhang Abbildung 38: Verteilung der Faserwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der bewässerten Variante Ende August 2006 im Praxisversuch.	150
Anhang Abbildung 39: Verteilung der Faserwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der bewässerten Variante Ende Oktober 2006 im Praxisversuch.	151
Anhang Abbildung 40: Verteilung der Faserwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der unbewässerten Variante Ende März 2006 im Praxisversuch.	151
Anhang Abbildung 41: Verteilung der Faserwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der unbewässerten Variante Ende Mai 2006 im Praxisversuch.	152
Anhang Abbildung 42: Verteilung der Faserwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der unbewässerten Variante Ende August 2006 im Praxisversuch.	152
Anhang Abbildung 43: Verteilung der Faserwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der unbewässerten Variante Ende Oktober 2006 im Praxisversuch.	153
Anhang Tabelle 1: Kulturmaßnahmen Feldversuchsflächen 2005	130
Anhang Tabelle 2: Kulturmaßnahmen Feldversuchsflächen 2006	131

Anhang Tabelle 1: Kulturmaßnahmen Feldversuchsflächen 2005

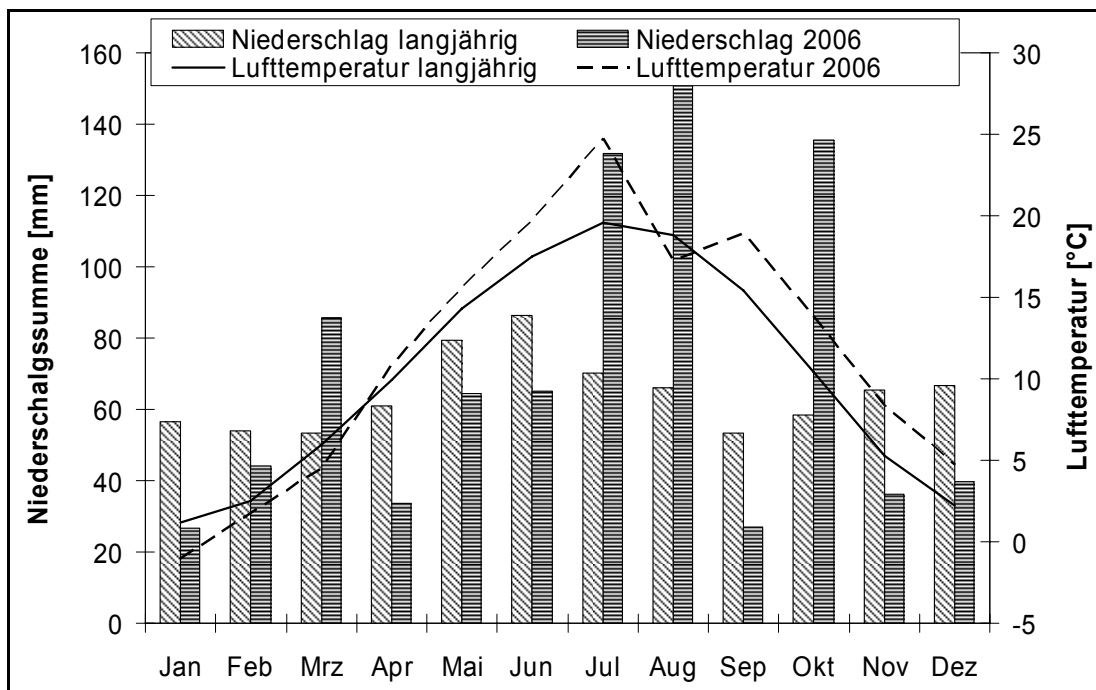
Datum	Durchgeführte Arbeiten
16.03.2005-19.03.2005	Aufdämmen, SW-Folie legen, Minitunnel stellen
26.04.2005	Minitunnel abbauen
10.05.2005	Düngung: 600 kg/ha Thomaskali
12.05.2005	SWT-Folie aufwickeln
13.05.2005	Letztes Stechen
13.05.2005	Abdämmen, Tiefenmeißel zwischen Reihen 90 cm tief lockern, mit Kreiselegge zwischen Reihen fahren, Düngung: 350 kg/ha Kalkstickstoff
14.05.2005	Herbizid- und Insektizidanwendung
19.05.2005	Fungizid- und Insektizidanwendung, Blattdüngung
27.05.2005	Fungizid- und Insektizidanwendung, Blattdüngung
06.06.2005	Düngung: Kalkstickstoff 200 kg/ha
08.06.2005	Herbizidanwendung
11.06.2005	Fungizidanwendung, Bittersalz, Blattdüngung
23.06.2005	Fungizidanwendung, Bittersalz, Blattdüngung
11.07.2005	Fungizidanwendung, Bittersalz, Blattdüngung
27.07.2005	Insektizidanwendung, Gasse mit Fräse 10 cm tief Fräsen
01.08.2005	Fungizidanwendung
17.08.2005	Fungizid- und Insektizidanwendung, Blattdüngung
23.08.2005	Ölrettich säen 20 kg/ha
30.08.2005	Fungizid- und Insektizidanwendung, Blattdüngung

Anhang Tabelle 2: Kulturmaßnahmen Feldversuchsflächen 2006

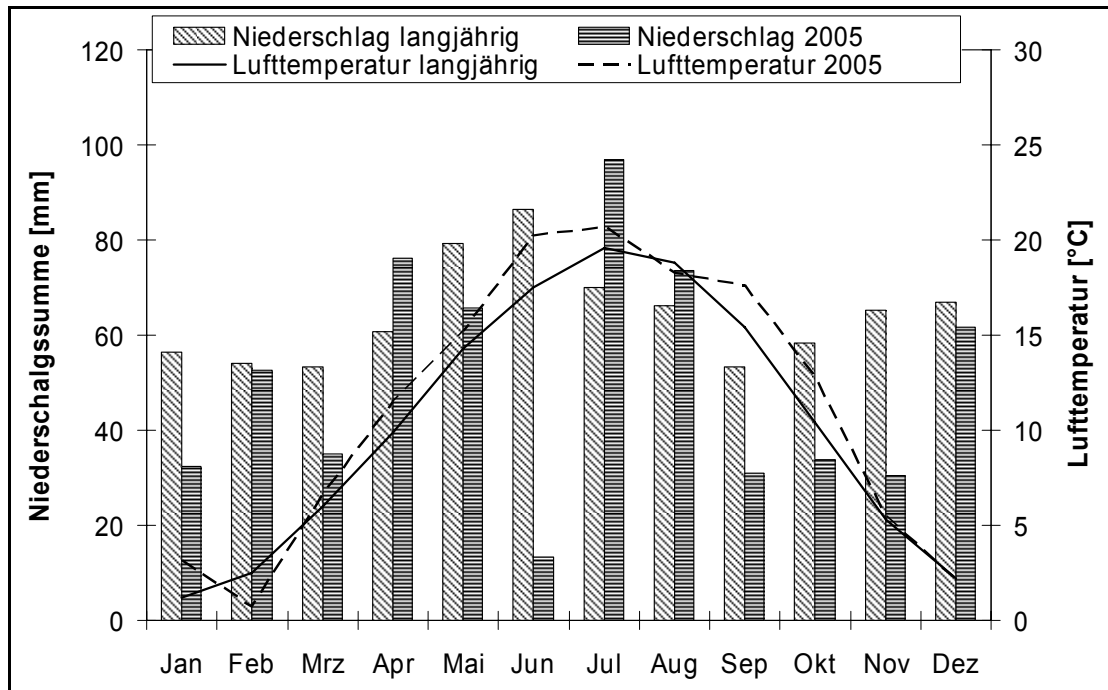
Datum	Durchgeführte Arbeiten
07.03.2006+19.03.2006	Aufdämmen, SW-Folie legen, Minitunnel stellen
22.05.2006	Düngung: 550 kg/ha Thomaskali
29.05.2006	Folie aufwickeln
29.05.2006	Letztes Stechen
30.05.2006	Abdämmen, Tiefenmeißel zwischen Reihen 90 cm tief lockern, mit Kreiselegge zwischen Reihen fahren
12.06.2006	Fungizid- und Insektizidanwendung
13.06.2006	Düngung: 350 kg/ha Kalkstickstoff
20.06.2006	Herbizid-, Fungizid- und Insektizidanwendung
29.06.2006	Fungizid- und Insektizidanwendung, Blattdüngung
13.07.2006	Fungizid- und Insektizidanwendung, Bittersalz
31.07.2006	Fungizid- und Insektizidanwendung, Blattdüngung
03.08.2006	Herbizidanwendung
15.08.2006	Ölrettich säen 20 kg/ha
23.08.2006	Fungizid- und Insektizidanwendung
07.09.2006	Fungizidanwendung



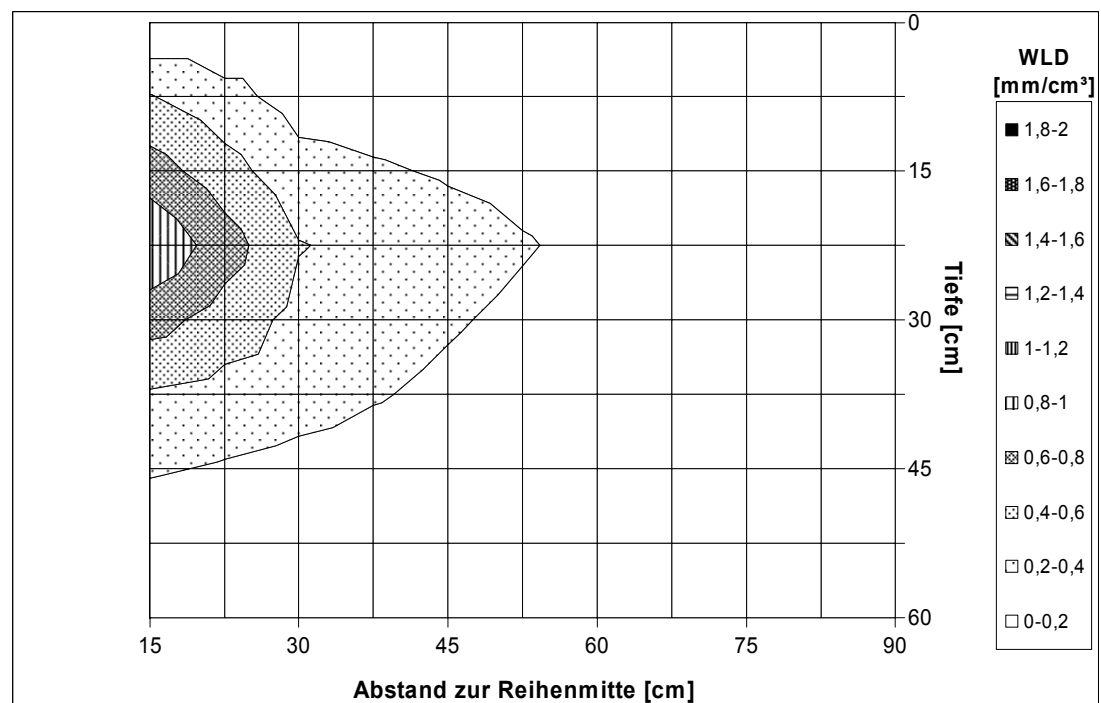
Anhang Abbildung 1: Verlauf der Monatsmitteltemperatur und der Monatssumme der Niederschläge sowohl des langjährigen Mittels (1971-2000) als auch im Versuchsjahr 2007. Wetterstation Karlsruhe (Quelle DWD 2007).



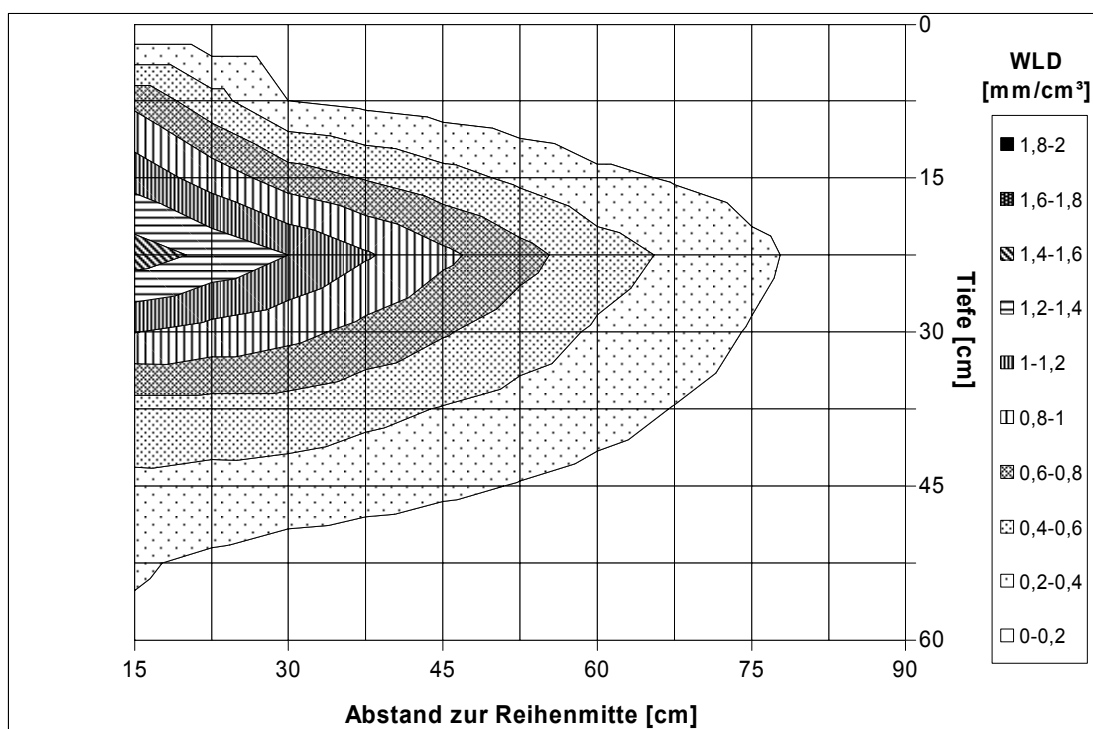
Anhang Abbildung 2: Verlauf der Monatsmitteltemperatur und der Monatssumme der Niederschläge sowohl des langjährigen Mittels (1971-2000) als auch im Versuchsjahr 2006. Wetterstation Karlsruhe (Quelle DWD 2007).



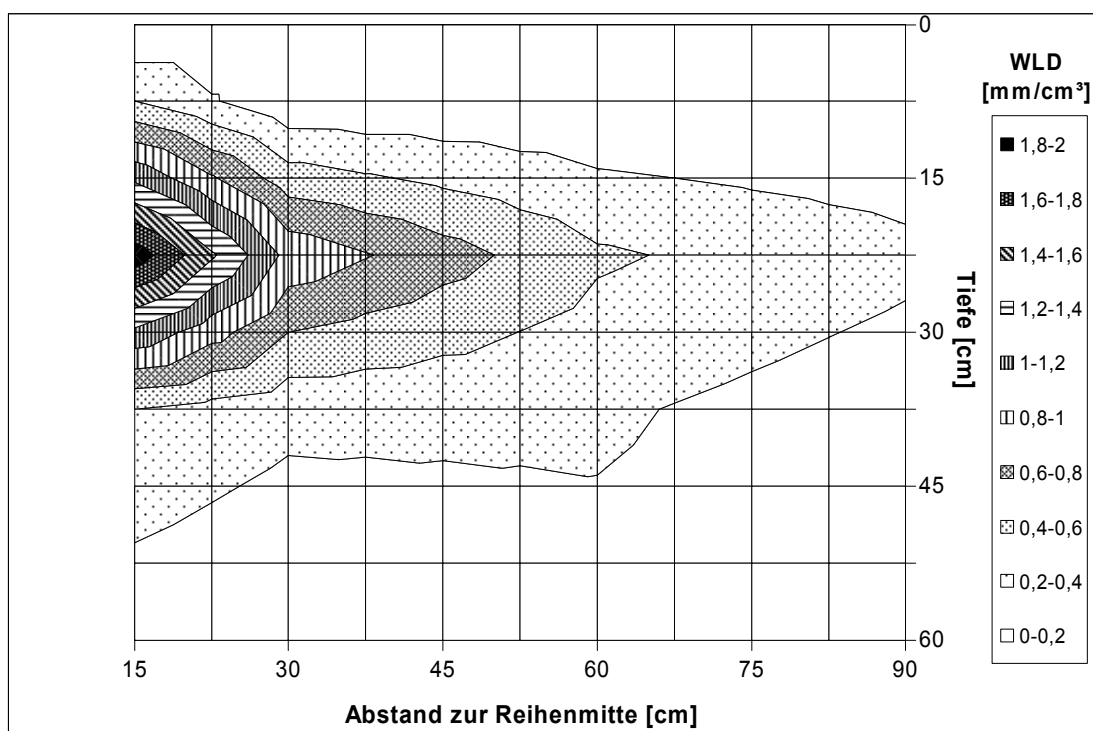
Anhang Abbildung 3: Verlauf der Monatsmitteltemperatur und der Monatssumme der Niederschläge sowohl des langjährigen Mittels (1971-2000) als auch im Versuchsjahr 2005. Wetterstation Karlsruhe (Quelle DWD 2007).



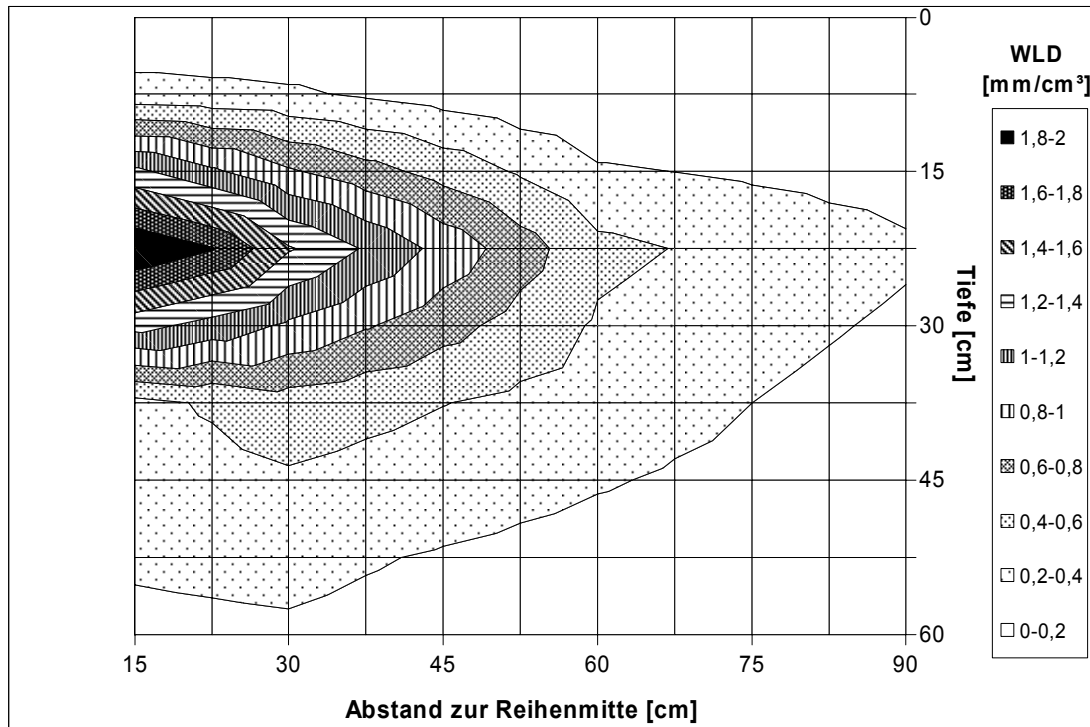
Anhang Abbildung 4: Verteilung der Speicherwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der bewässerten Variante Ende März 2005 im Praxisversuch.



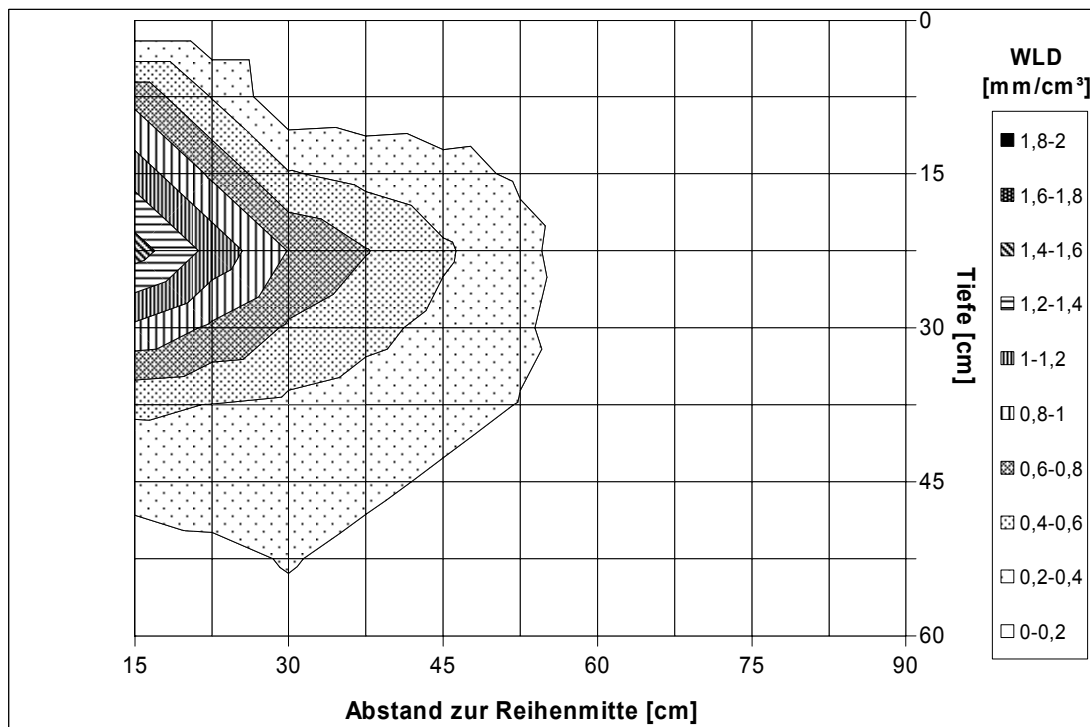
Anhang Abbildung 5: Verteilung der Speicherwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der bewässerten Variante Ende Mai 2005 im Praxisversuch.



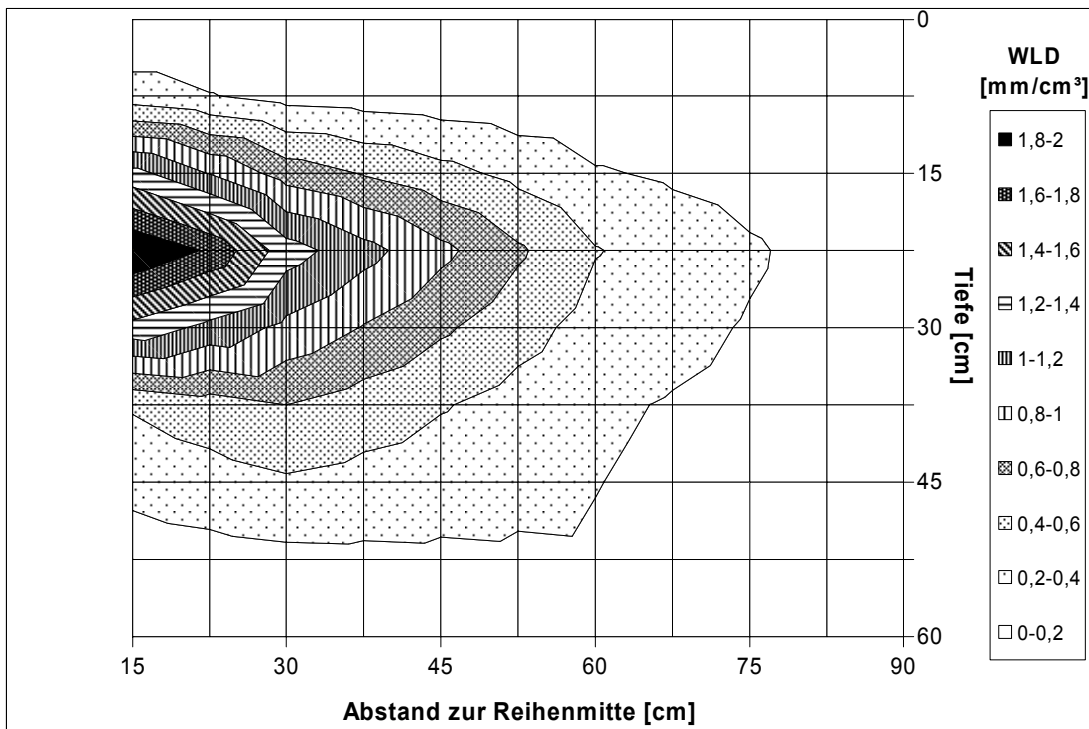
Anhang Abbildung 6: Verteilung der Speicherwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der bewässerten Variante Ende Juni 2005 im Praxisversuch.



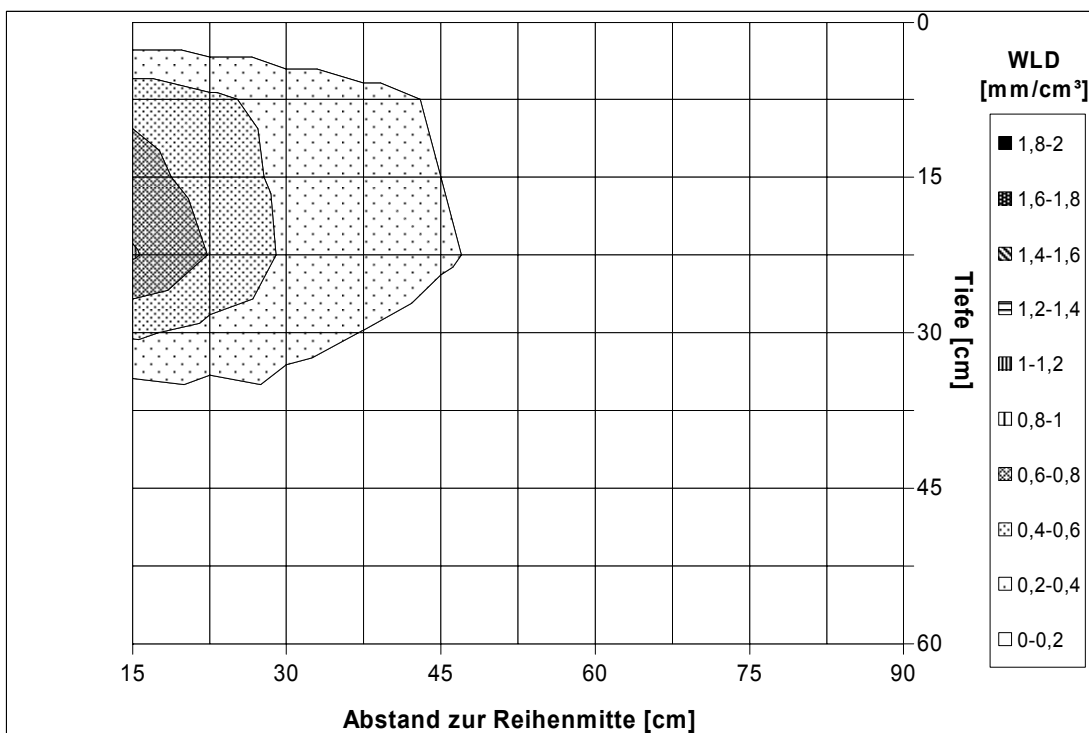
Anhang Abbildung 7: Verteilung der Speicherwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der bewässerten Variante Ende Juli 2005 im Praxisversuch.



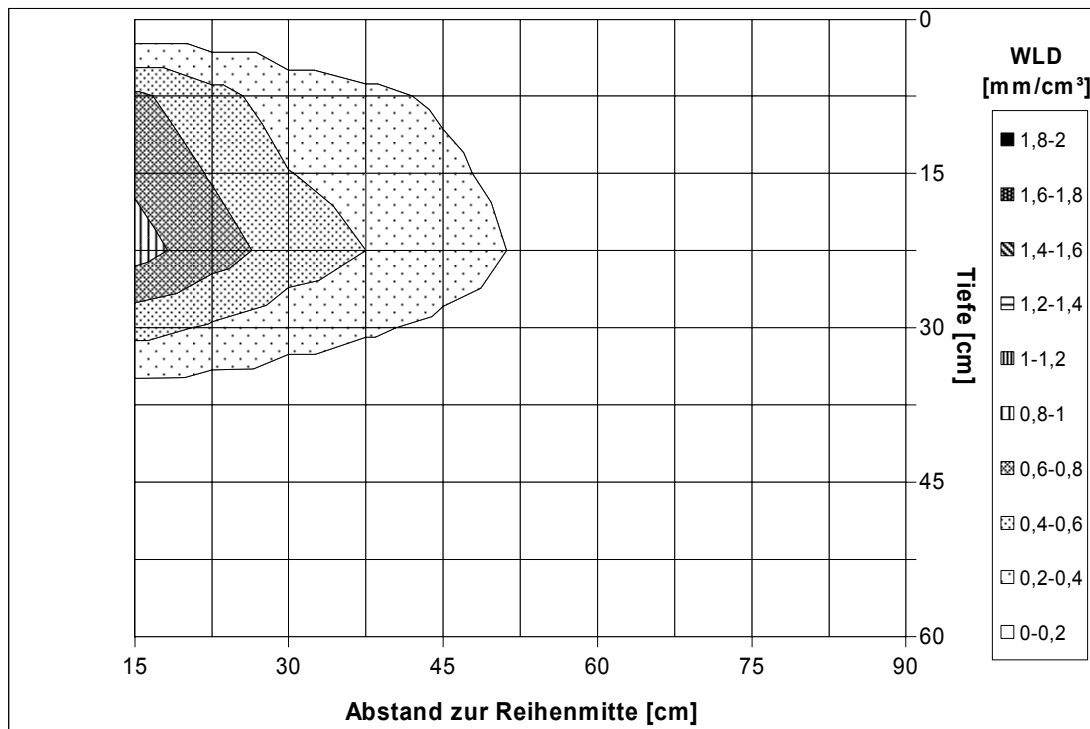
Anhang Abbildung 8: Verteilung der Speicherwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der bewässerten Variante Ende August 2005 im Praxisversuch.



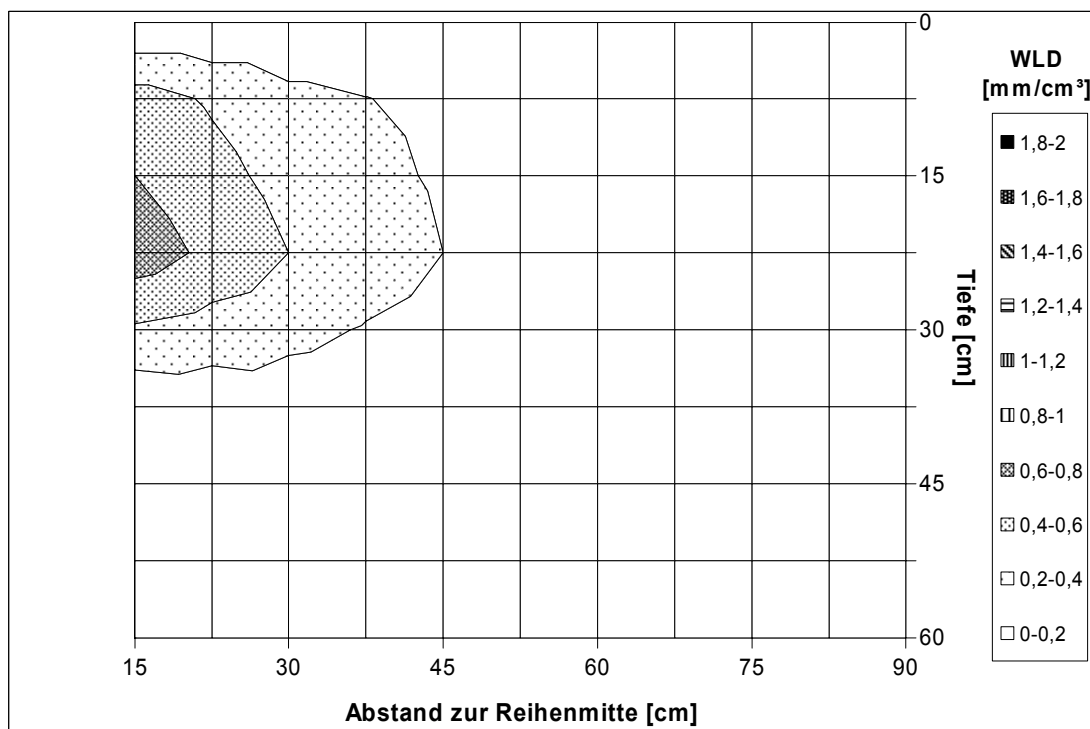
Anhang Abbildung 9: Verteilung der Speicherwurzel-Längen-Dichte [mm cm⁻³] in der bewässerten Variante Ende Oktober 2005 im Praxisversuch.



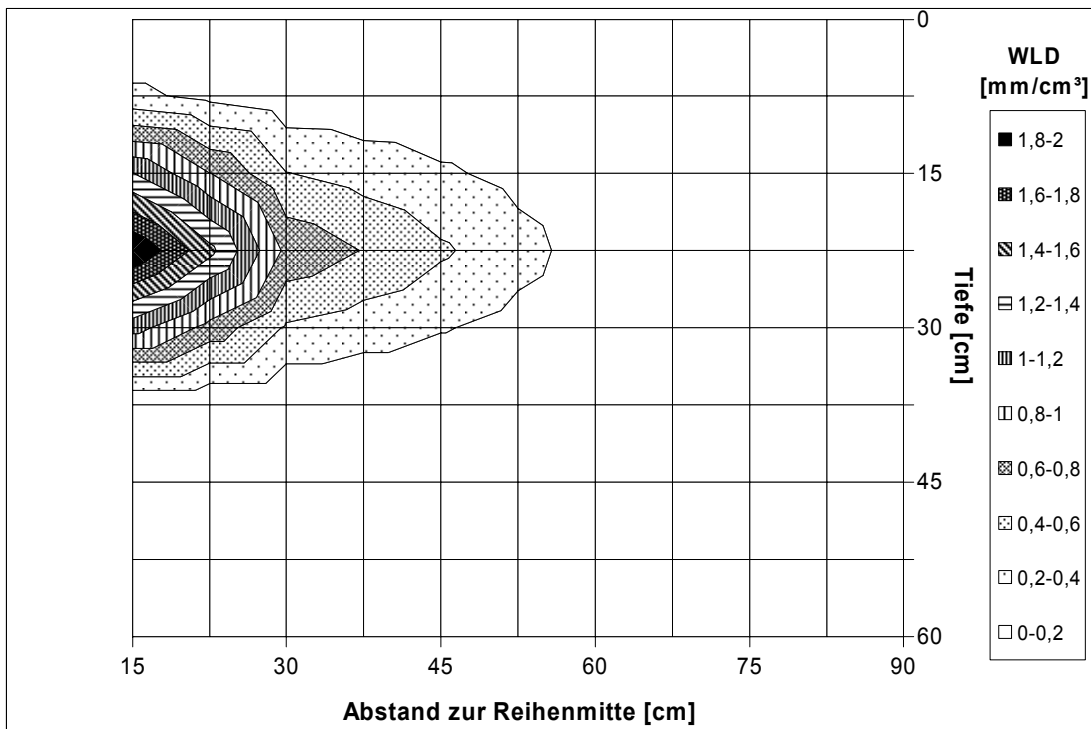
Anhang Abbildung 10: Verteilung der Speicherwurzel-Längen-Dichte [mm cm⁻³] in der unbewässerten Variante Ende März 2005 im Praxisversuch.



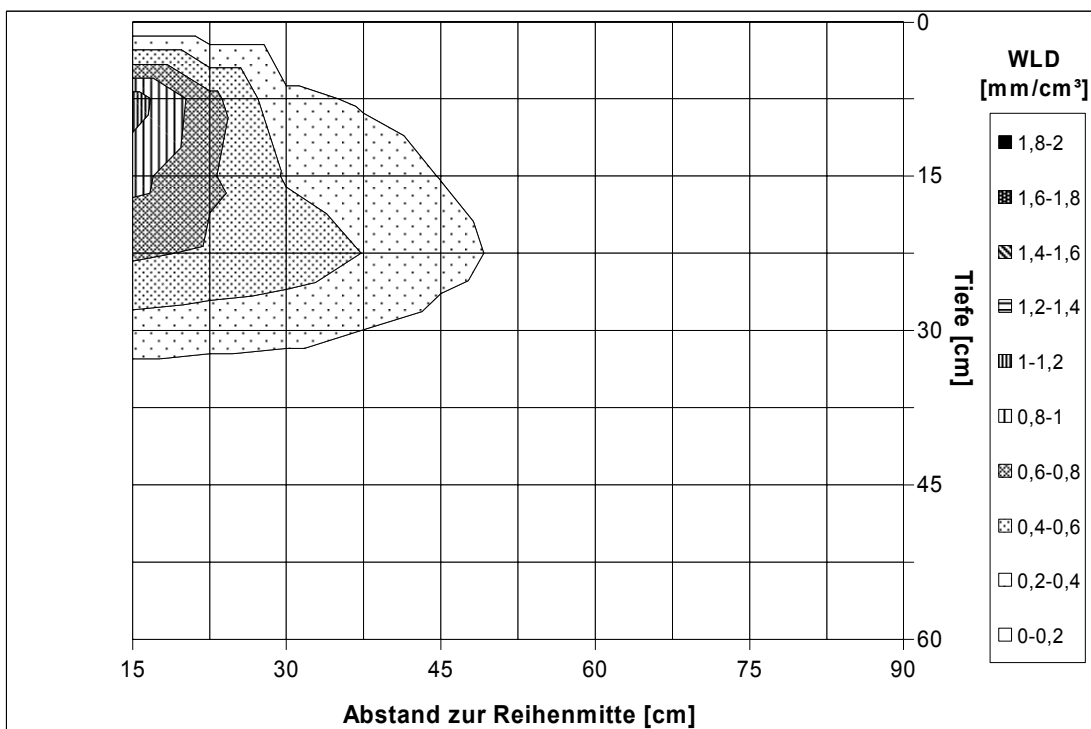
Anhang Abbildung 11: Verteilung der Speicherwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der unbewässerten Variante Ende Mai 2005 im Praxisversuch.



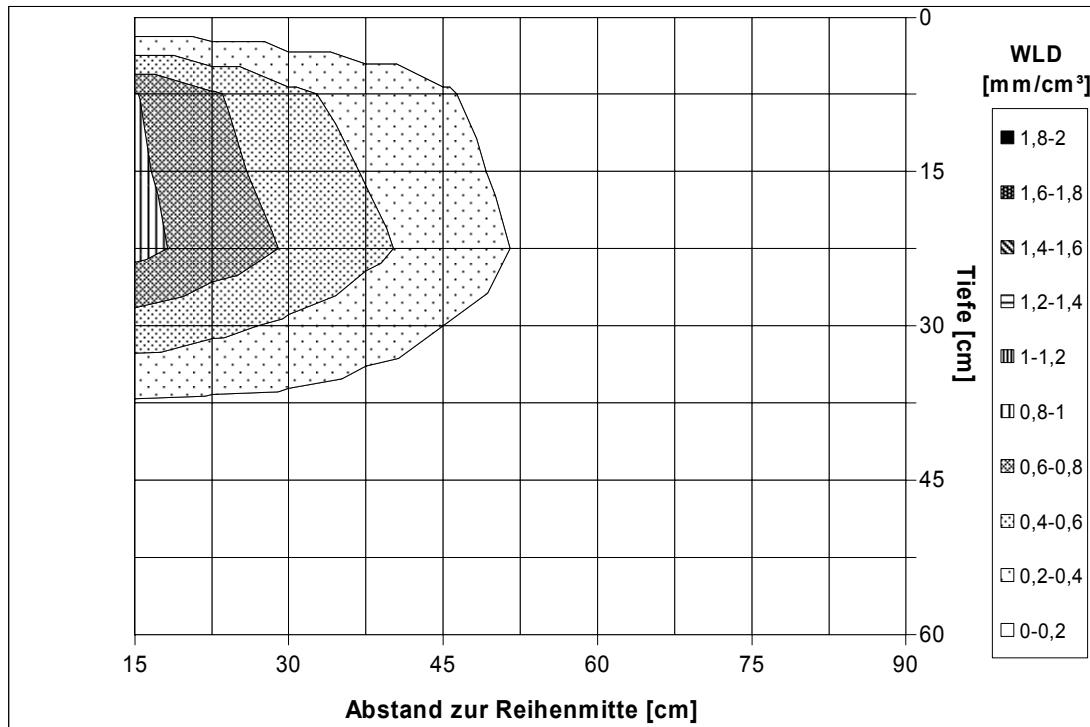
Anhang Abbildung 12: Verteilung der Speicherwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der unbewässerten Variante Ende Juni 2005 im Praxisversuch.



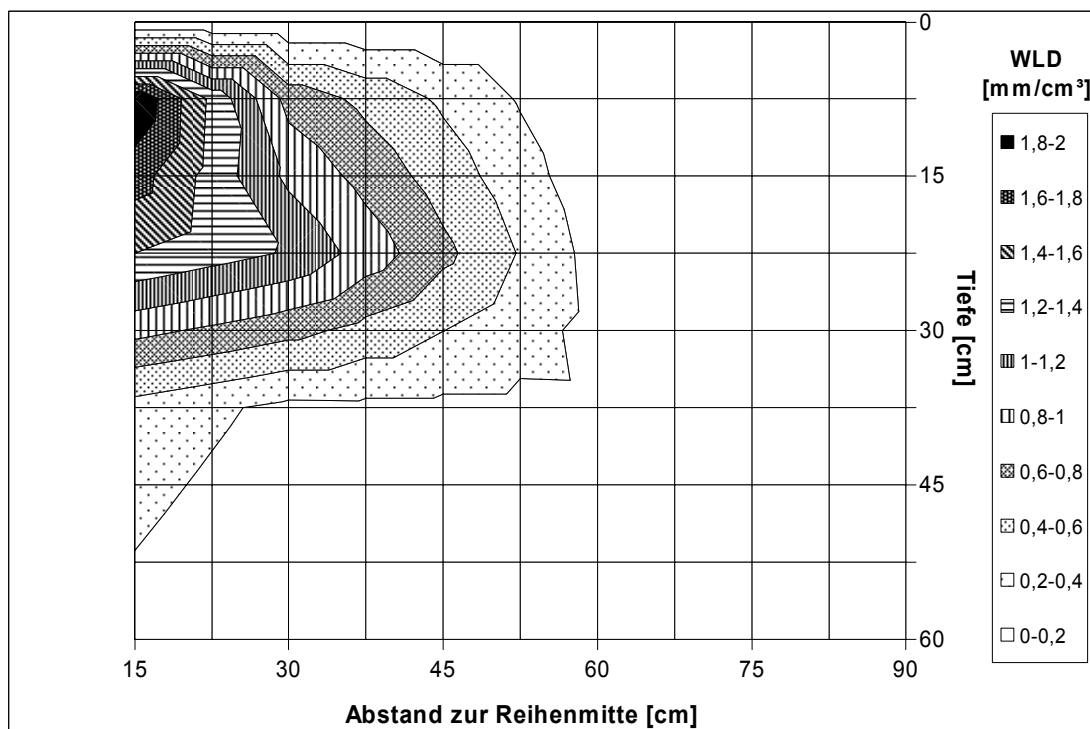
Anhang Abbildung 13: Verteilung der Speicherwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der unbewässerten Variante Ende August 2005 im Praxisversuch.



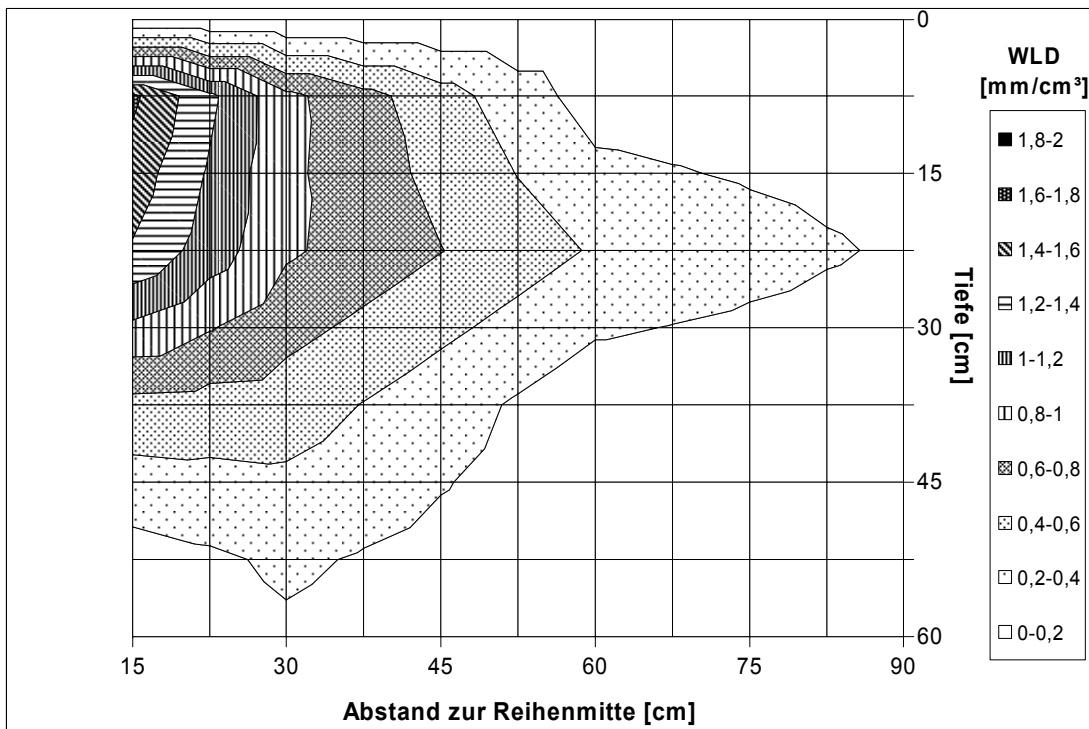
Anhang Abbildung 14: Verteilung der Speicherwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der unbewässerten Variante Ende Oktober 2005 im Praxisversuch.



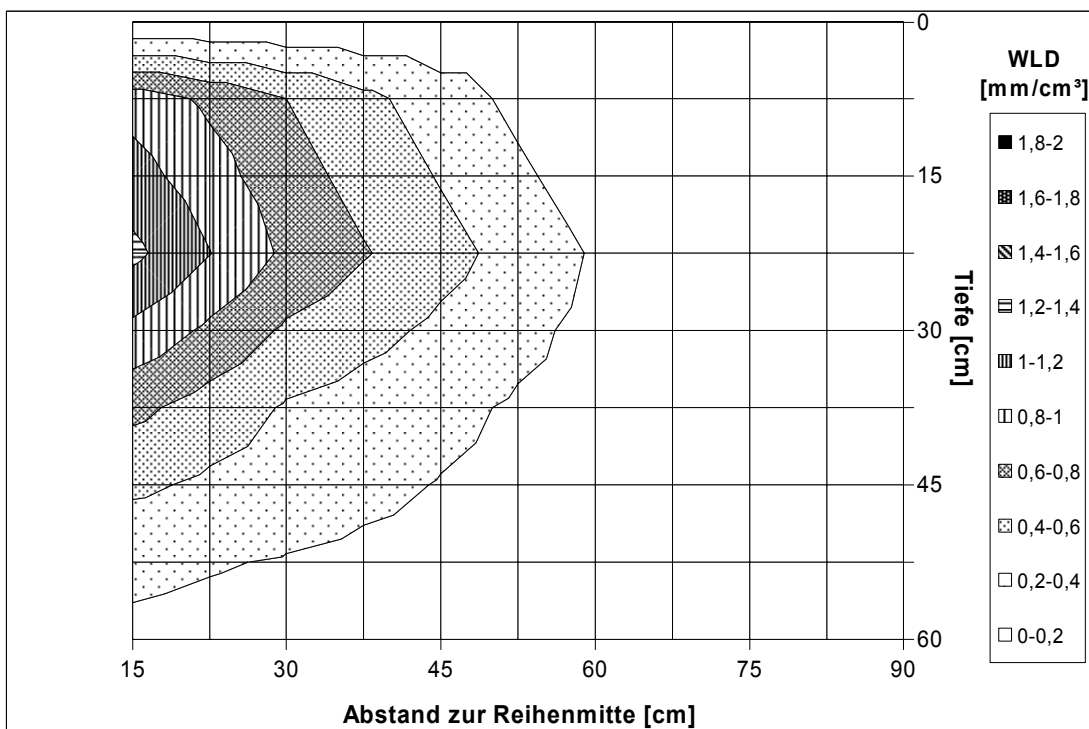
Anhang Abbildung 15: Verteilung der Speicherwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der bewässerten Variante Ende März 2006 im Praxisversuch.



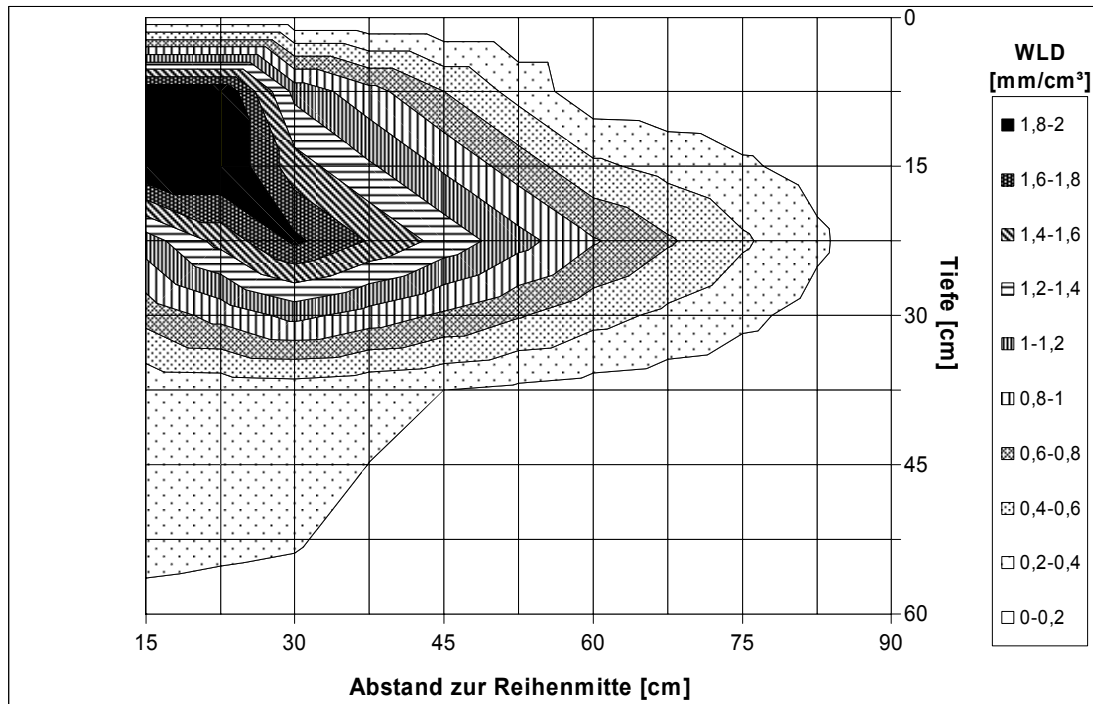
Anhang Abbildung 16: Verteilung der Speicherwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der bewässerten Variante Ende Mai 2006 im Praxisversuch.



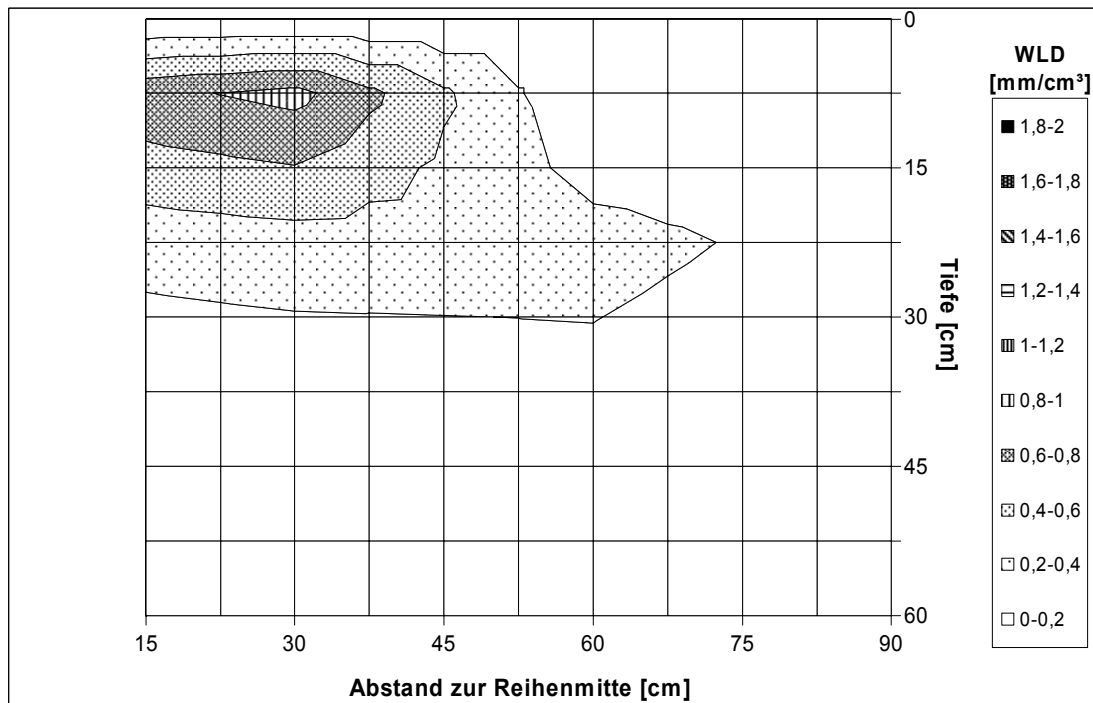
Anhang Abbildung 17: Verteilung der Speicherwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der bewässerten Variante Ende Juli 2006 im Praxisversuch.



Anhang Abbildung 18: Verteilung der Speicherwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der bewässerten Variante Ende August 2006 im Praxisversuch.



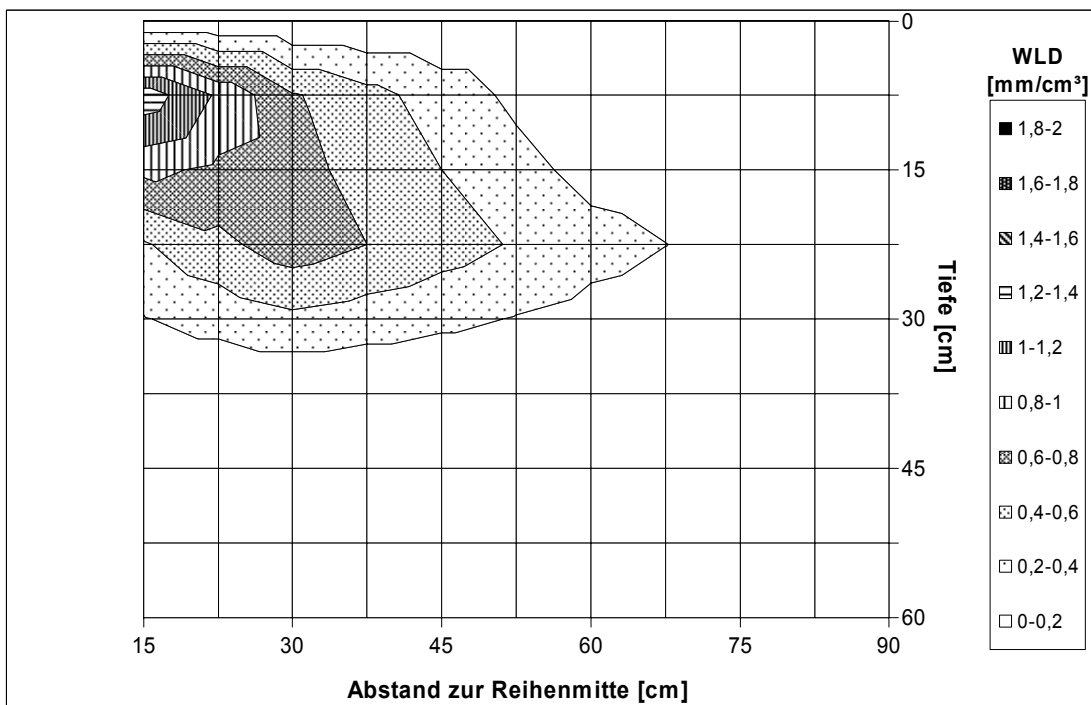
Anhang Abbildung 19: Verteilung der Speicherwurzel-Längen-Dichte [mm cm⁻³] in der bewässerten Variante Ende Oktober 2006 im Praxisversuch.



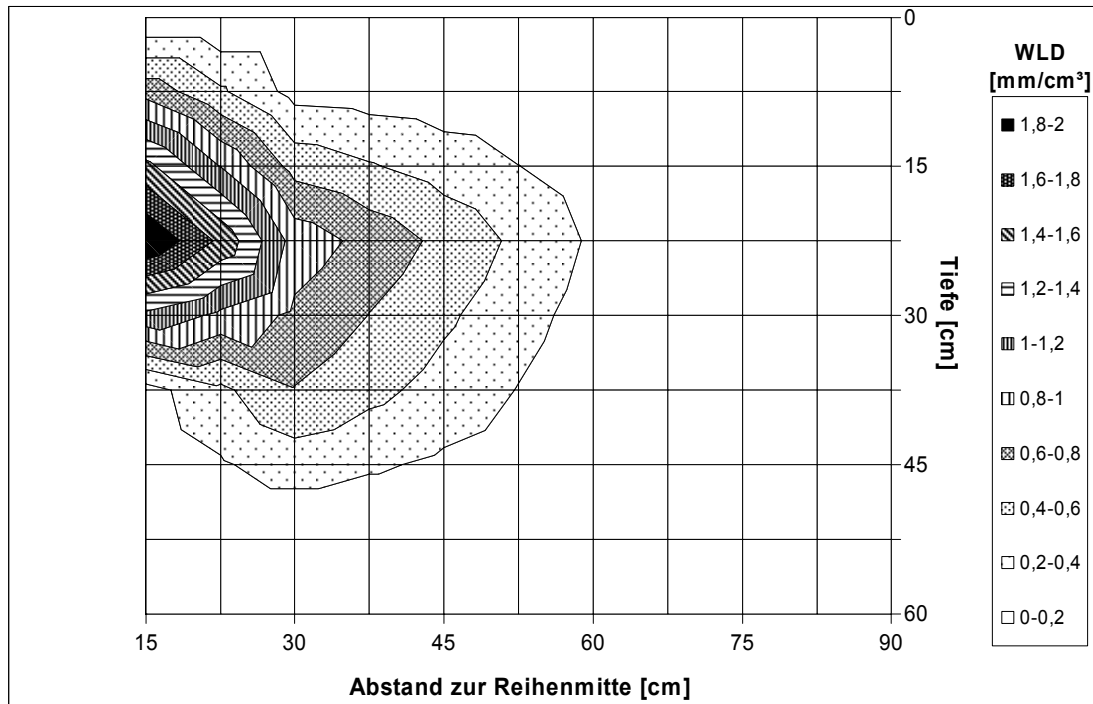
Anhang Abbildung 20: Verteilung der Speicherwurzel-Längen-Dichte [mm cm⁻³] in der unbewässerten Variante Ende März 2006 im Praxisversuch.



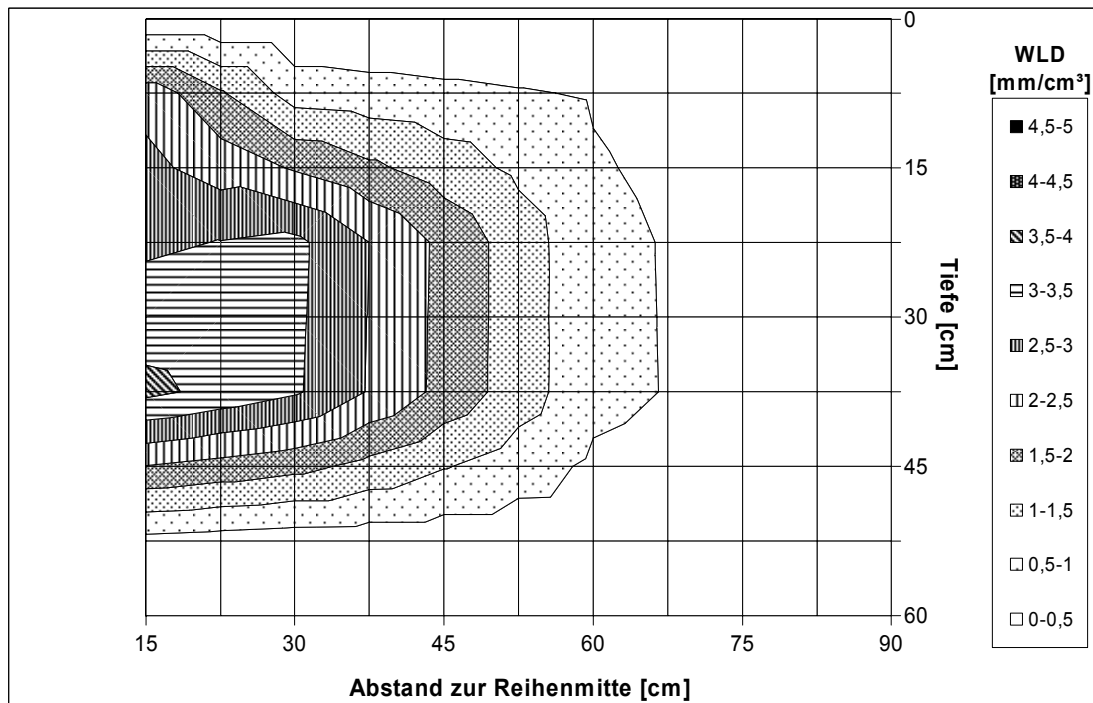
Anhang Abbildung 21: Verteilung der Speicherwurzel-Längen-Dichte [mm cm⁻³] in der unbewässerten Variante Ende Mai 2006 im Praxisversuch.



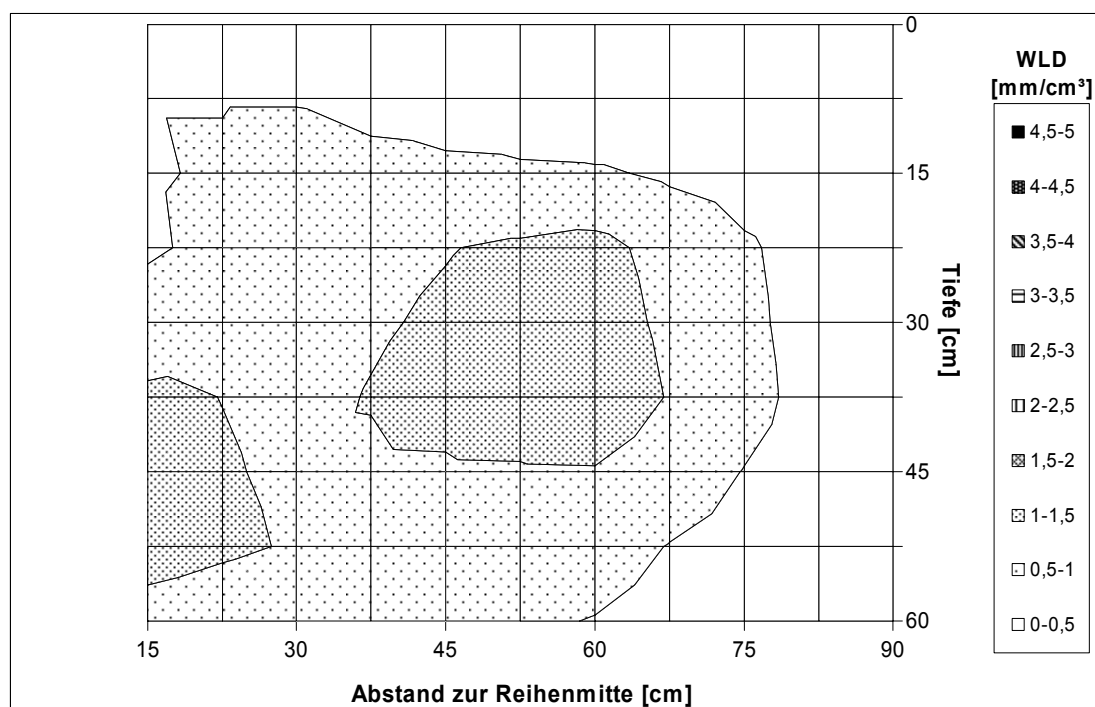
Anhang Abbildung 22: Verteilung der Speicherwurzel-Längen-Dichte [mm cm⁻³] in der unbewässerten Variante Ende August 2006 im Praxisversuch.



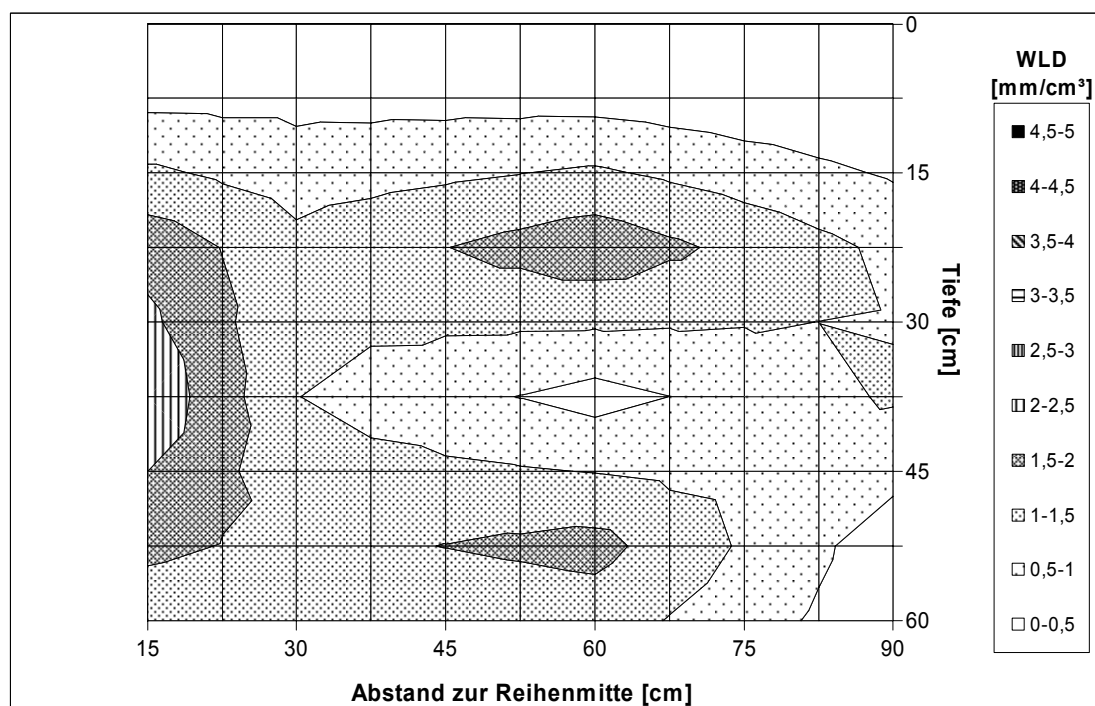
Anhang Abbildung 23: Verteilung der Speicherwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der unbewässerten Variante Ende Oktober 2006 im Praxisversuch.



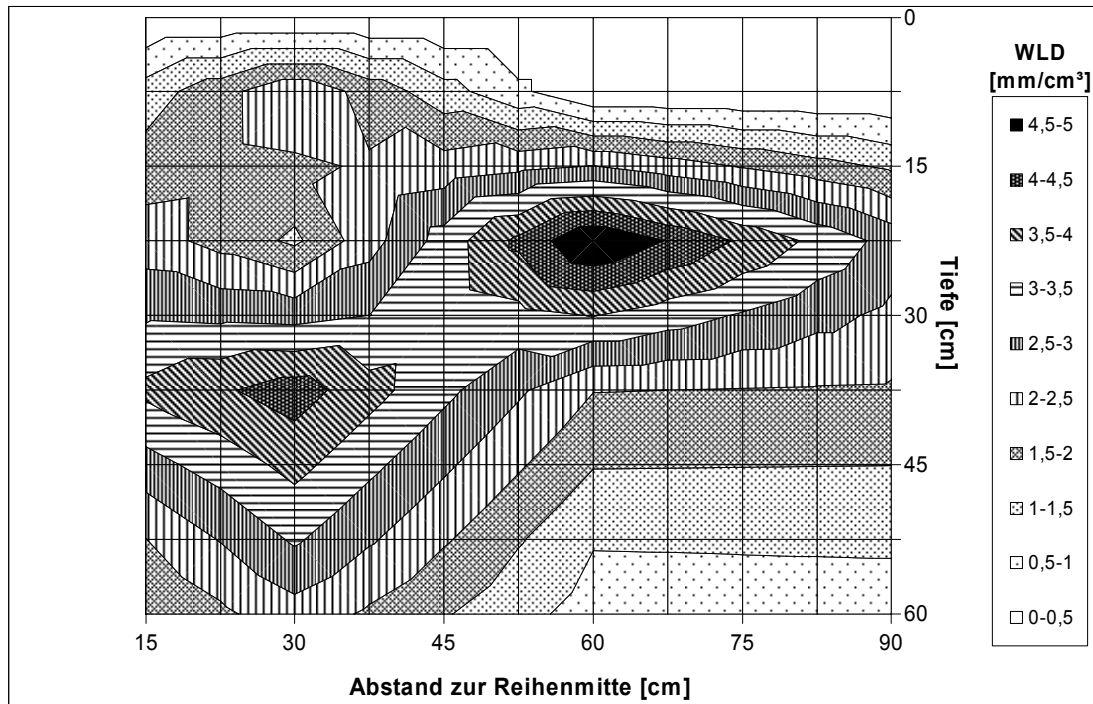
Anhang Abbildung 24: Verteilung der Faserwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der bewässerten Variante Ende März 2005 im Praxisversuch.



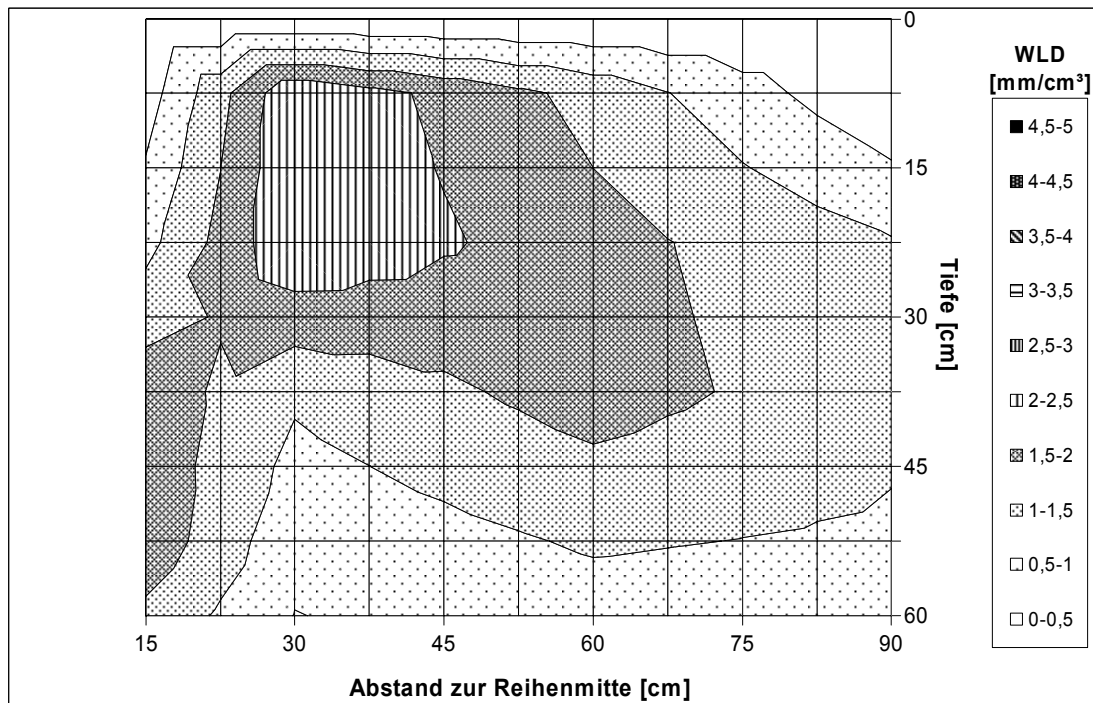
Anhang Abbildung 25: Verteilung der Faserwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der bewässerten Variante Ende Mai 2005 im Praxisversuch.



Anhang Abbildung 26: Verteilung der Faserwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der bewässerten Variante Ende Juni 2005 im Praxisversuch.



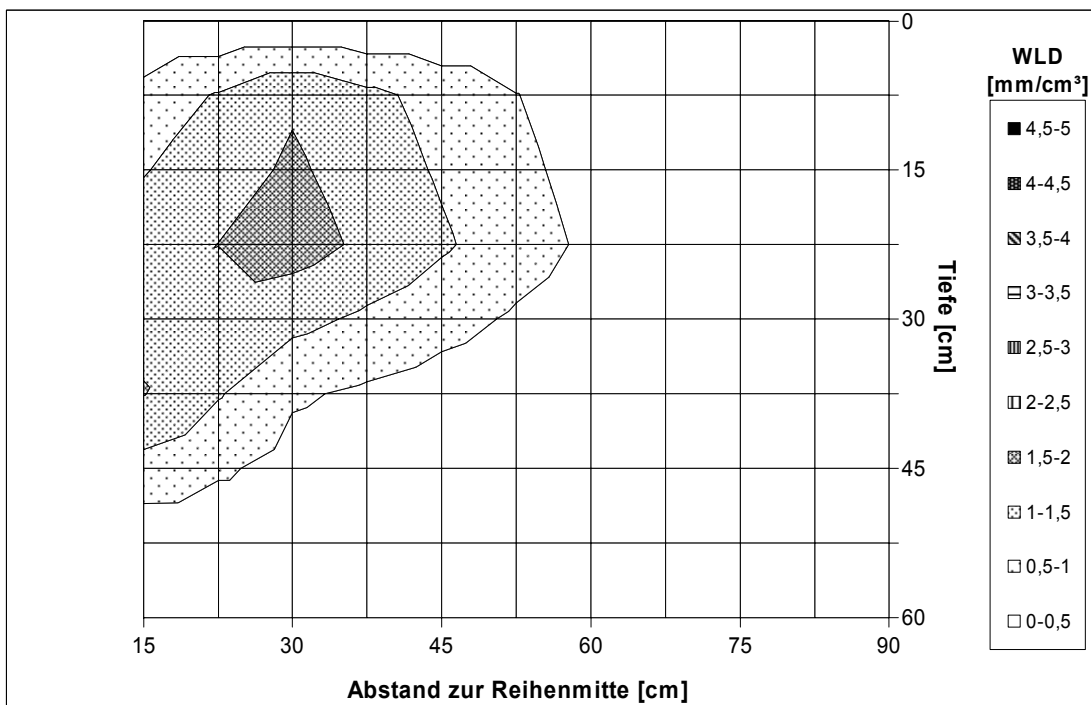
Anhang Abbildung 27: Verteilung der Faserwurzel-Längen-Dichte [mm cm⁻³] in der bewässerten Variante Ende Juli 2005 im Praxisversuch.



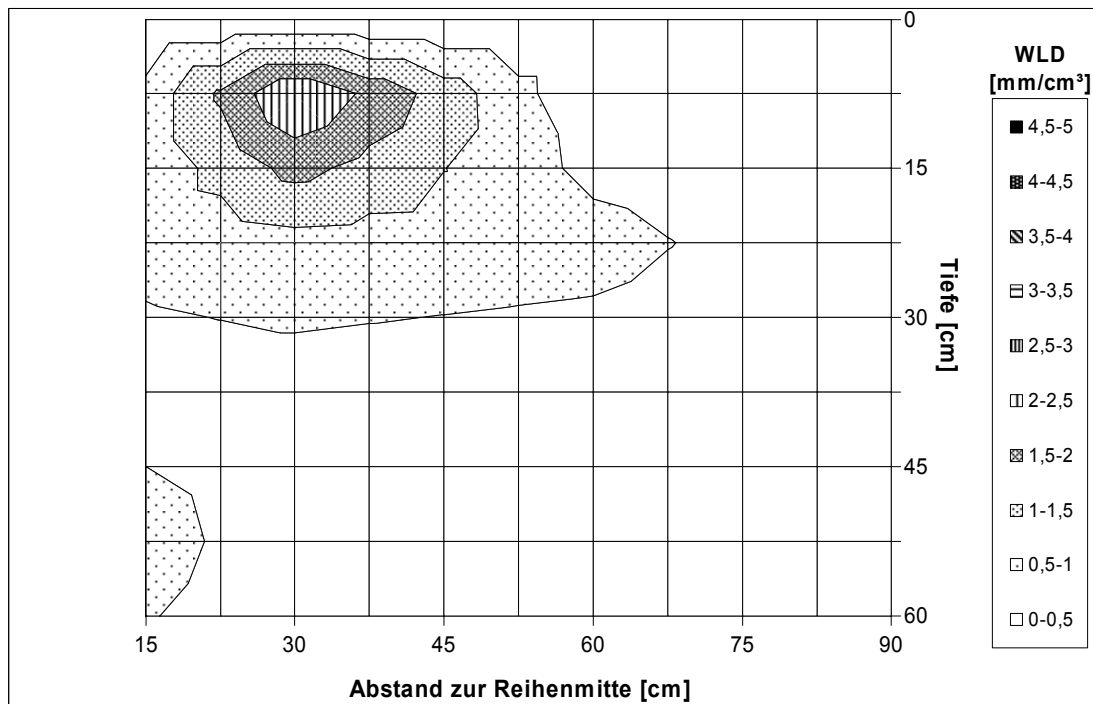
Anhang Abbildung 28: Verteilung der Faserwurzel-Längen-Dichte [mm cm⁻³] in der bewässerten Variante Ende August 2005 im Praxisversuch.



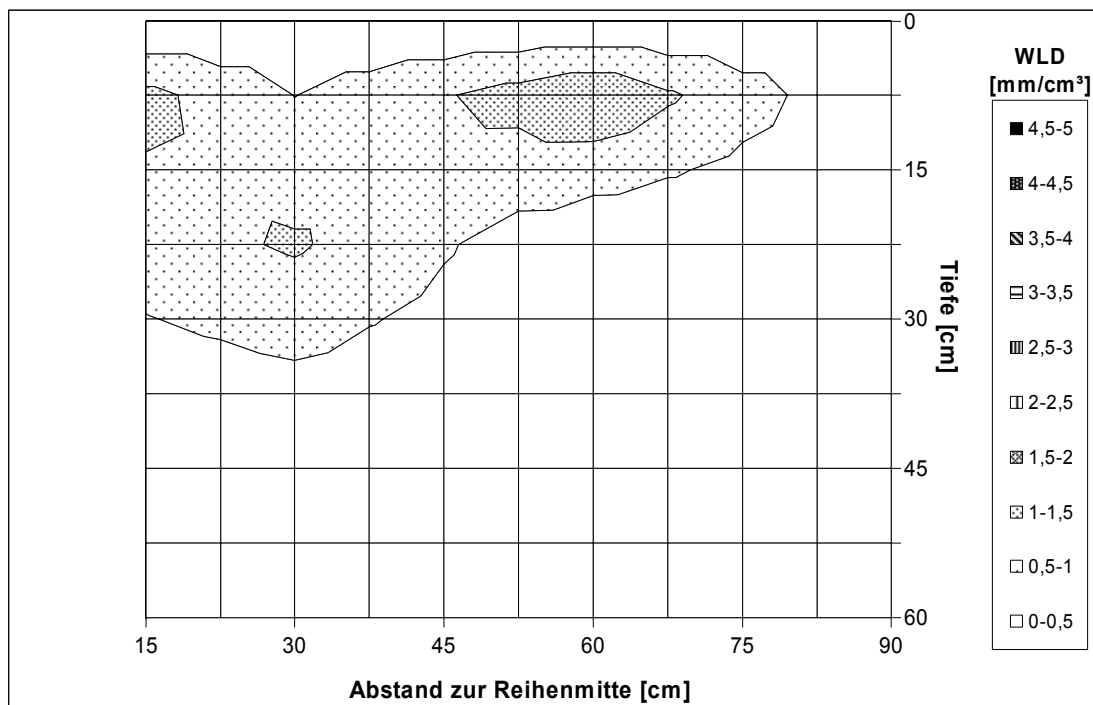
Anhang Abbildung 29: Verteilung der Faserwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der bewässerten Variante Ende Oktober 2005 im Praxisversuch.



Anhang Abbildung 30: Verteilung der Faserwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der ununbewässerten Variante Ende März 2005 im Praxisversuch.



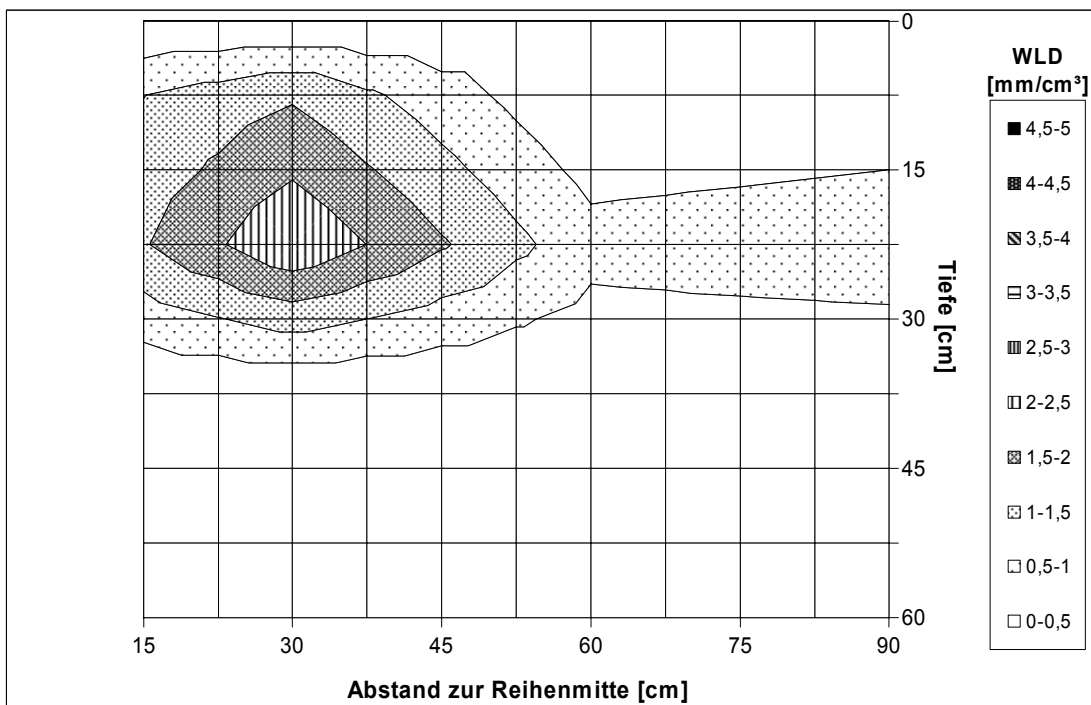
Anhang Abbildung 31: Verteilung der Faserwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der unbewässerten Variante Ende Mai 2005 im Praxisversuch.



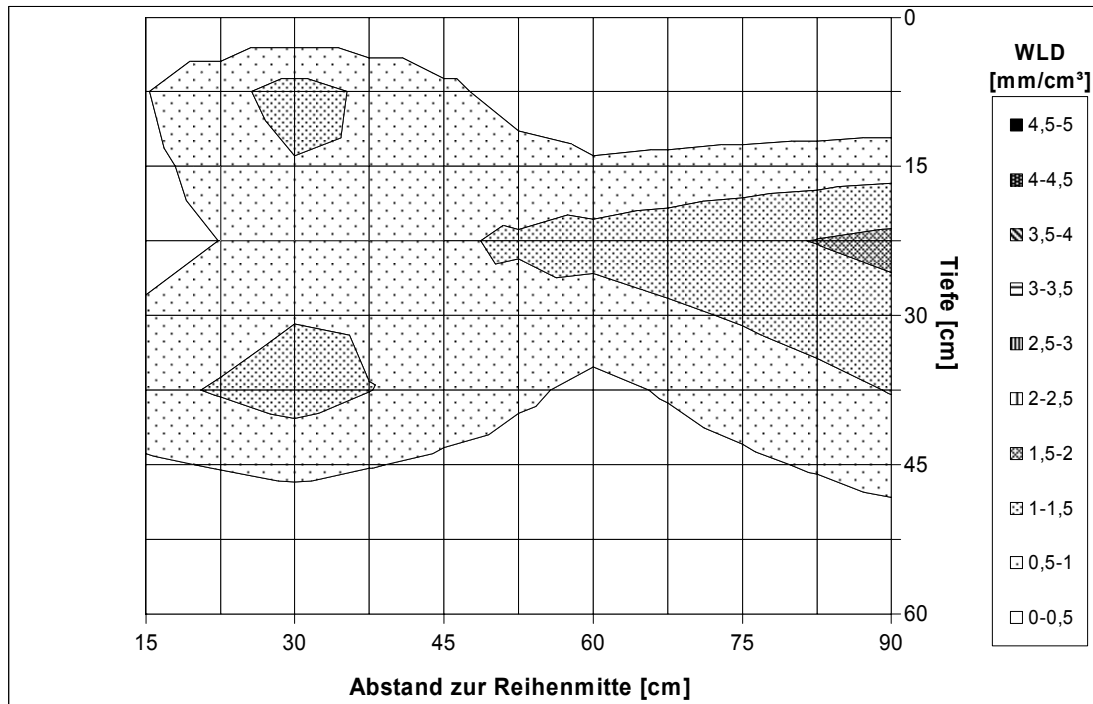
Anhang Abbildung 32: Verteilung der Faserwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der unbewässerten Variante Ende Juni 2005 im Praxisversuch.



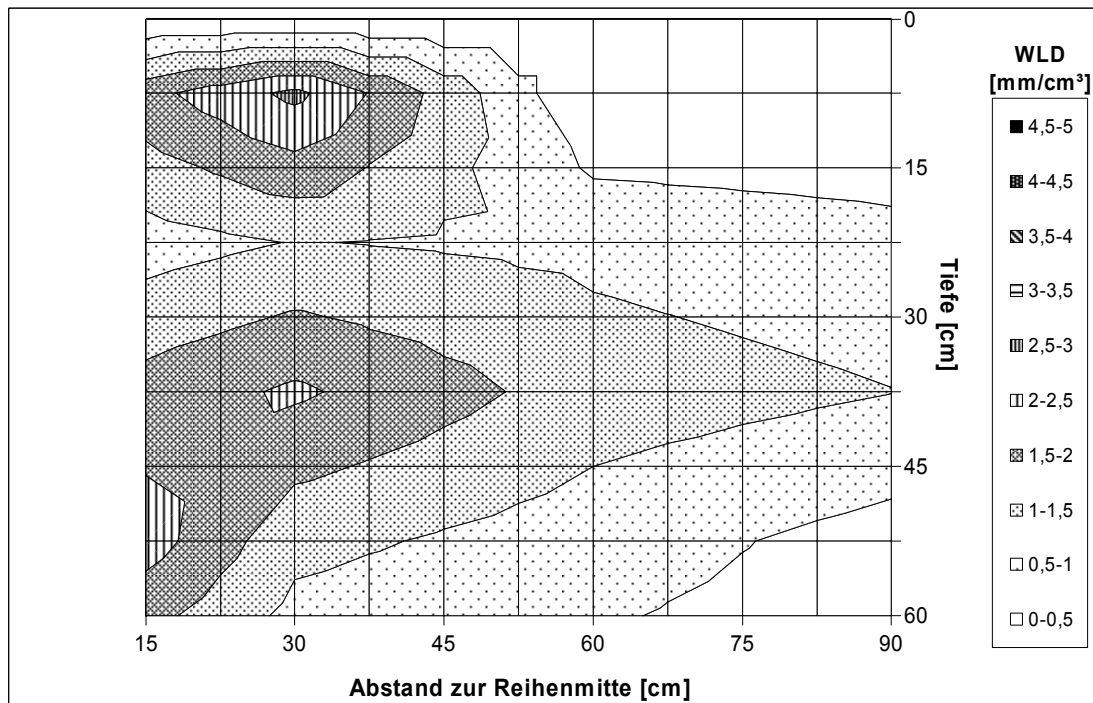
Anhang Abbildung 33: Verteilung der Faserwurzel-Längen-Dichte [mm cm⁻³] in der unbewässerten Variante Ende August 2005 im Praxisversuch.



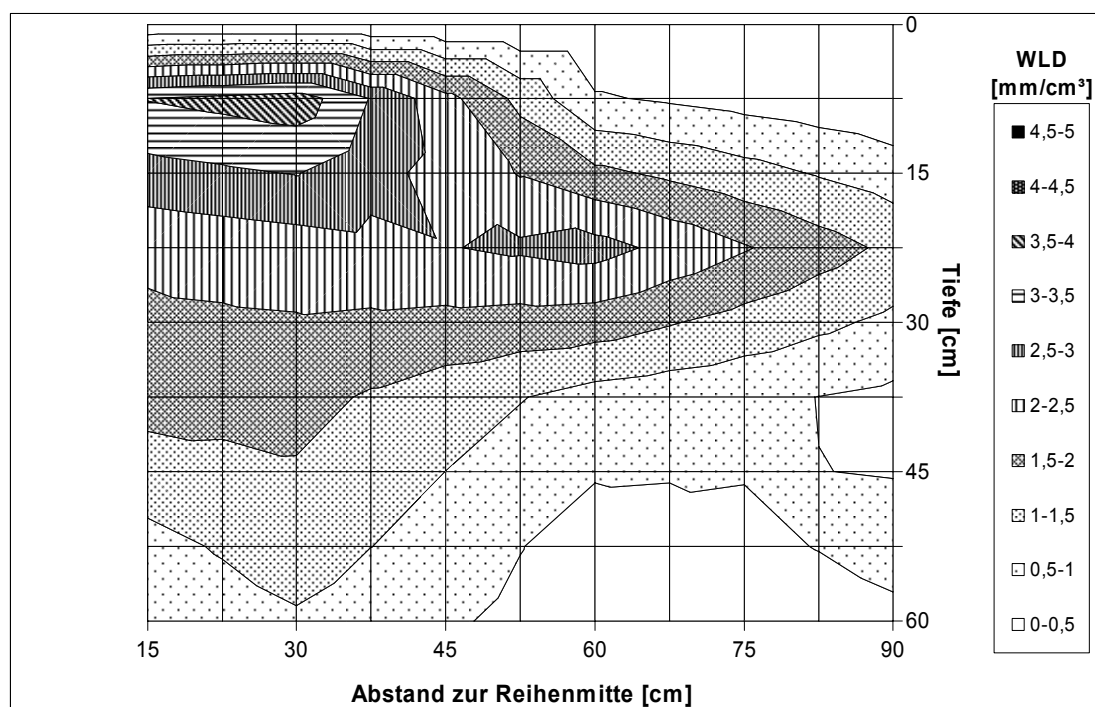
Anhang Abbildung 34: Verteilung der Faserwurzel-Längen-Dichte [mm cm⁻³] in der unbewässerten Variante Ende Oktober 2005 im Praxisversuch.



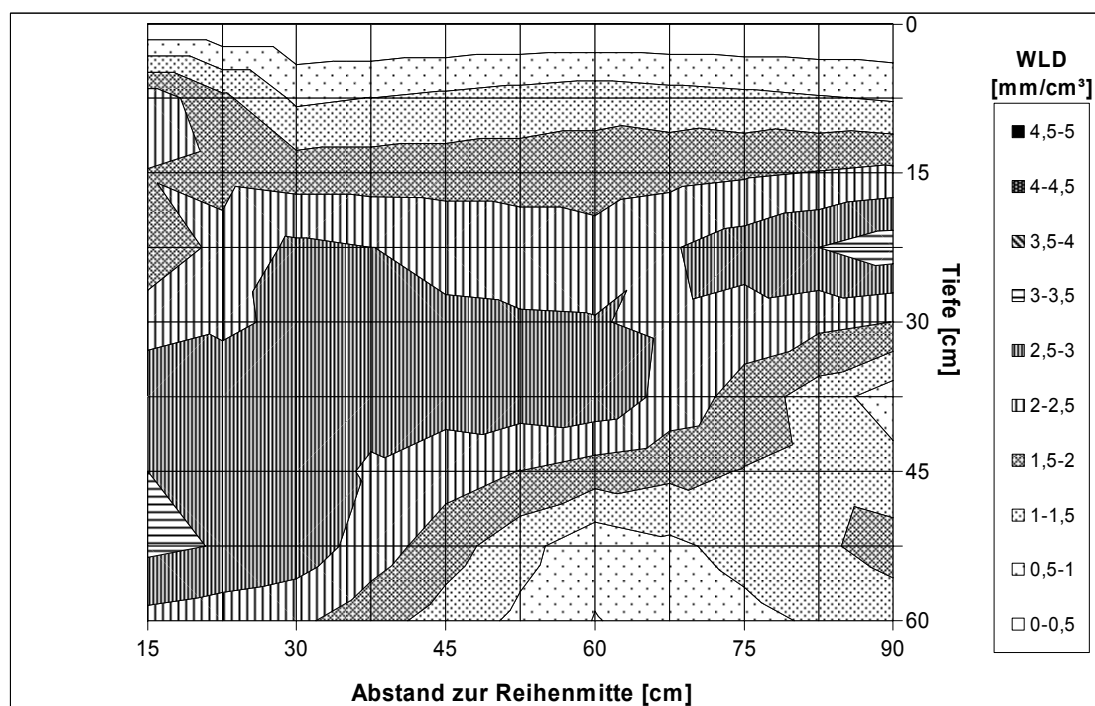
Anhang Abbildung 35: Verteilung der Faserwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der bewässerten Variante Ende März 2006 im Praxisversuch.



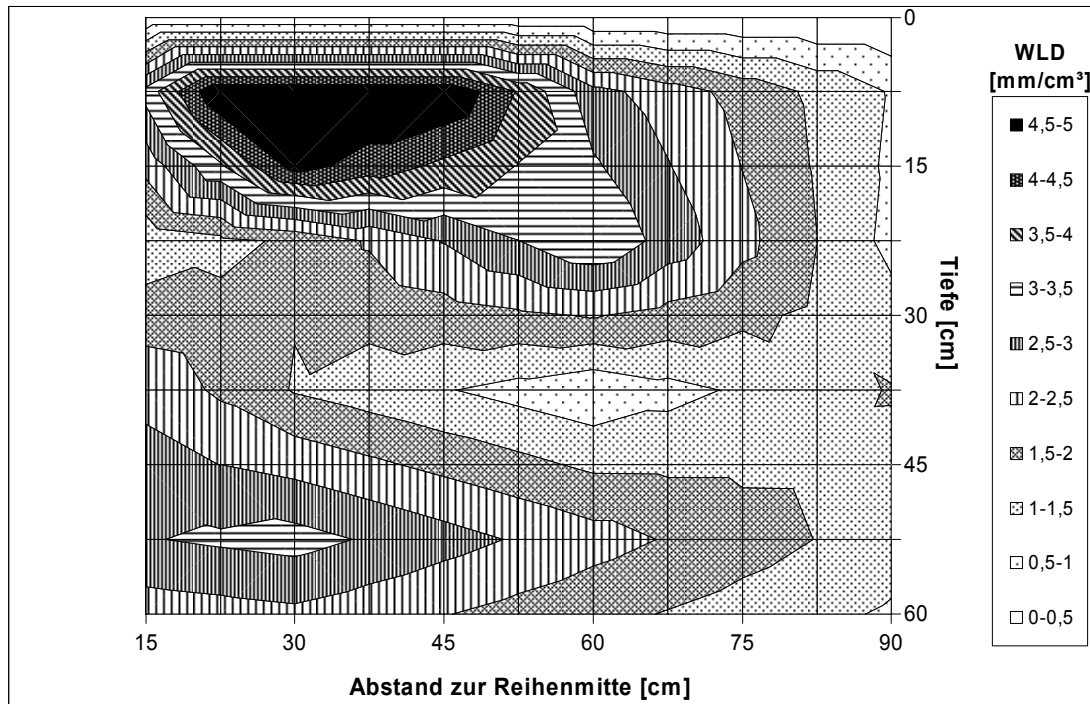
Anhang Abbildung 36: Verteilung der Faserwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der bewässerten Variante Ende Mai 2006 im Praxisversuch.



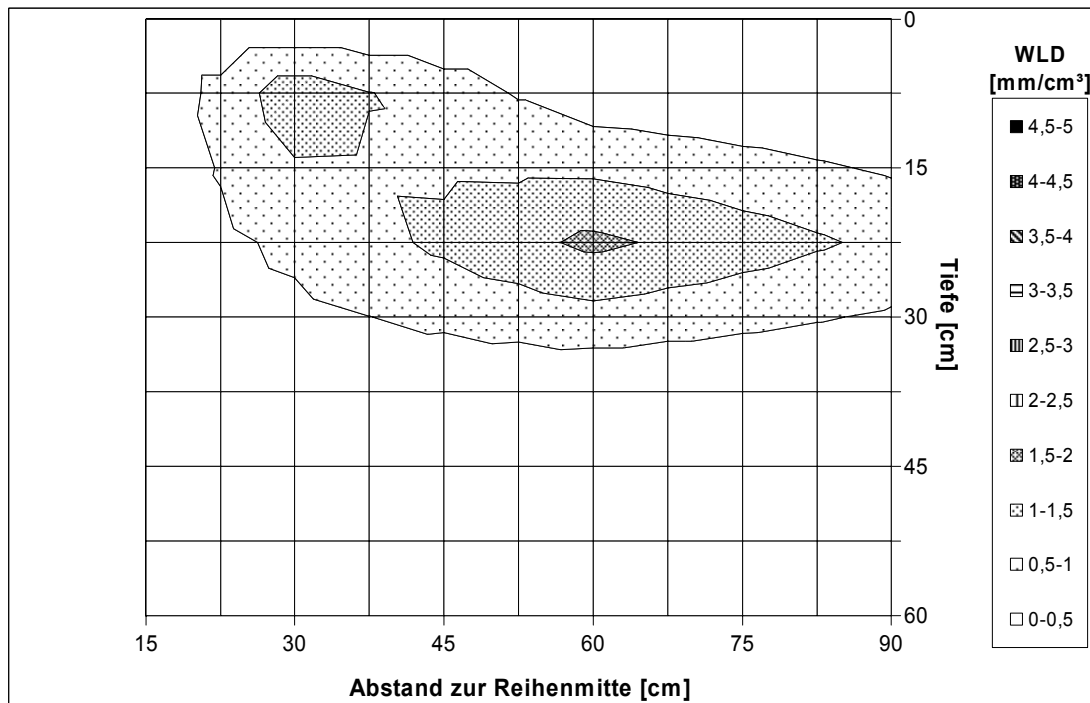
Anhang Abbildung 37: Verteilung der Faserwurzel-Längen-Dichte [mm cm⁻³] in der bewässerten Variante Ende Juli 2006 im Praxisversuch.



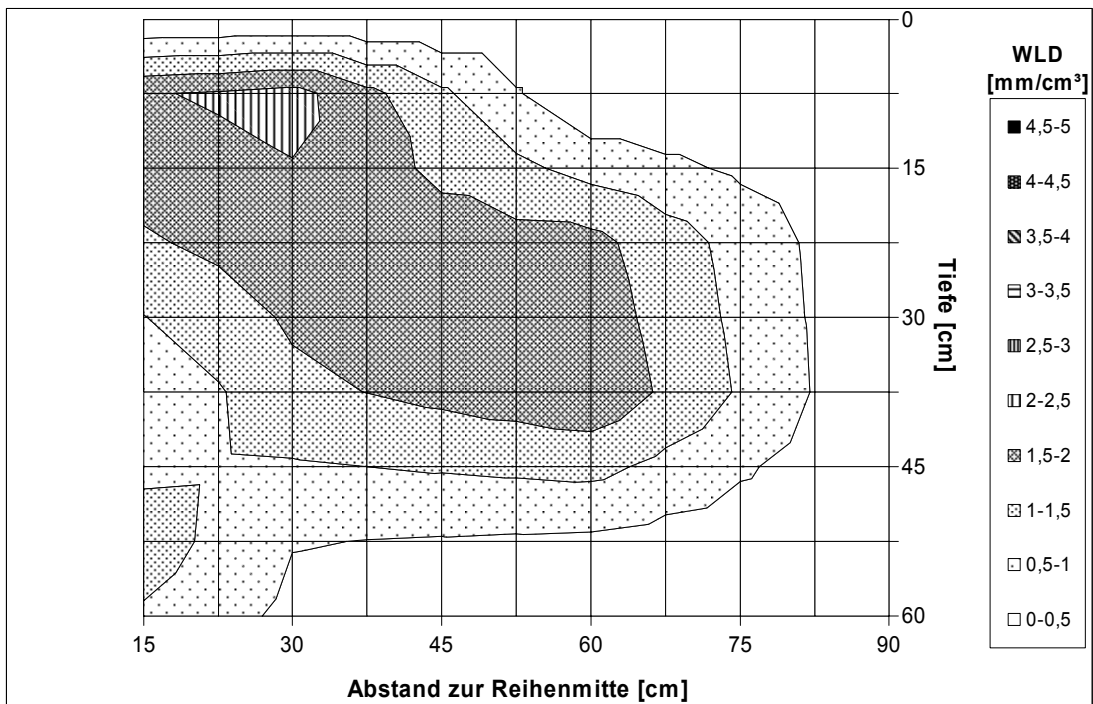
Anhang Abbildung 38: Verteilung der Faserwurzel-Längen-Dichte [mm cm⁻³] in der bewässerten Variante Ende August 2006 im Praxisversuch.



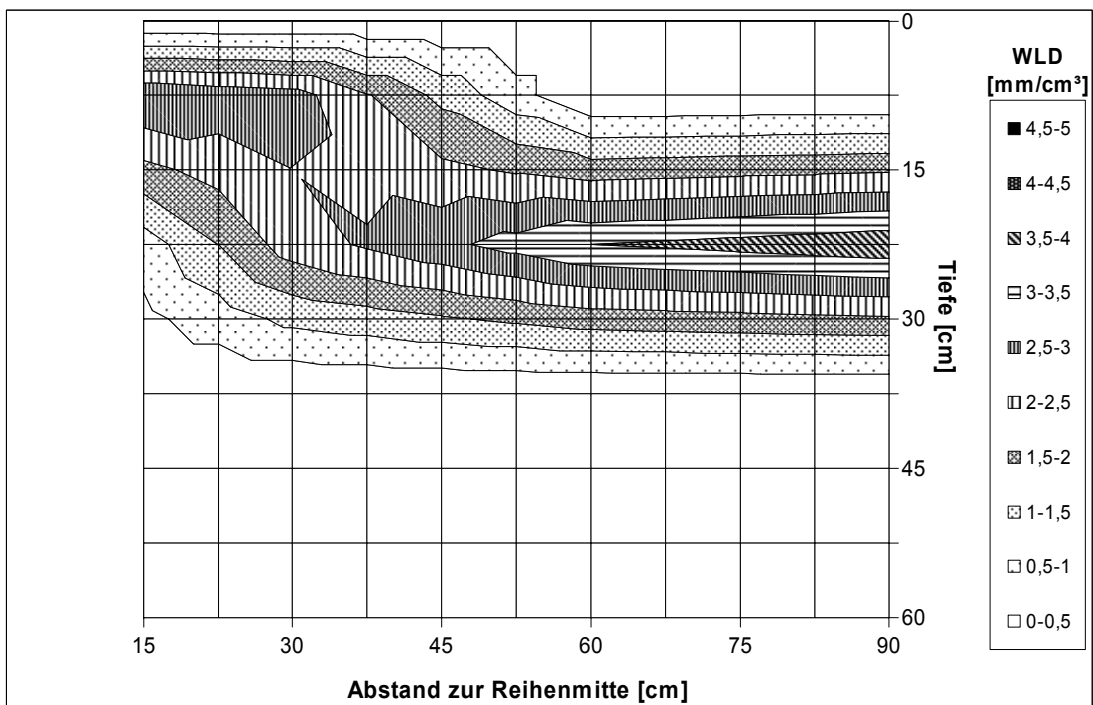
Anhang Abbildung 39: Verteilung der Faserwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der bewässerten Variante Ende Oktober 2006 im Praxisversuch.



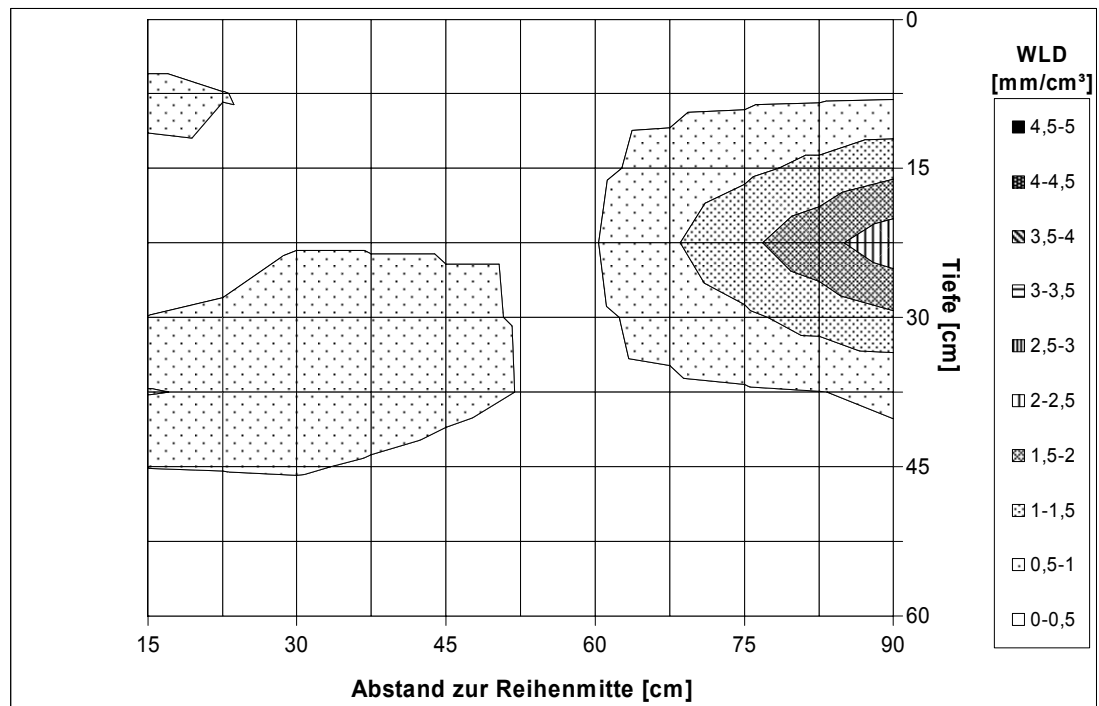
Anhang Abbildung 40: Verteilung der Faserwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der unbewässerten Variante Ende März 2006 im Praxisversuch.



Anhang Abbildung 41: Verteilung der Faserwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der unbewässerten Variante Ende Mai 2006 im Praxisversuch.



Anhang Abbildung 42: Verteilung der Faserwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der unbewässerten Variante Ende August 2006 im Praxisversuch.



Anhang Abbildung 43: Verteilung der Faserwurzel-Längen-Dichte [mm cm^{-3}] in der unbewässerten Variante Ende Oktober 2006 im Praxisversuch.

Danksagung

Mein Dank gilt:

.... Herrn Prof. Dr. P.-J. Paschold für interessante Aufgabenstellung, die Überlassung des Arbeitsplatzes und das Vertrauen in meine Herangehensweise an die Problemstellungen. Sowie die Übernahme der Gutachtertätigkeit

.... Herrn Doz. Dr. sc. Drs. h.c. M. Böhme für die Übernahme der Gutachtertätigkeit.

.... der Familie Gehrler und deren Mitarbeiter, ohne deren Überlassung ihrer Anbaufläche und Mithilfe die Probenahme auf der Praxisversuchsfläche nicht möglich gewesen wäre.

.... ganz besonders Frau Jana Schaller, für ihre stetige Bereitschaft Ergebnisse zu diskutieren, ihre Hilfsbereitschaft und ihre Freundlichkeit, welche die Doktoranden- und Arbeitszeit zur Freude gemacht hat.

.... Herrn Norbert Mayer und Herrn Jürgen Kleber für die Hilfestellung bei der Versuchsdurchführung, die fachliche Diskussion und die Hilfsbereitschaft bei PC-Problemen.

.... allen Mitarbeitern des Fachgebietes Gemüsebau der Forschungsanstalt Geisenheim, besonders bei den „Zeichenfeen“, ohne deren Mithilfe die endlose Flut an Wurzelbildern nicht zu bearbeiten gewesen wäre.

.... Herrn Dr. Ludger Aldenhoff für die stundenlange Diskussion zum Thema Spargel.

.... Herrn Benjamin Weinheimer für die Reparatur des Bohrstockes nach jeder Probenahme.

.... Herrn Prof. Dr. K. Velten für die Einführung in die mathematische Welt der Modellbildung

.... der DBU für die finanzielle Unterstützung dieser Arbeit.

.... und nicht zuletzt allen Mitgliedern meiner Familie ohne deren Unterstützung ich nicht soweit gekommen wäre.

Lebenslauf

geboren am 30.01.1978 in Landau/Pfalz

verheiratet mit Melanie Weinheimer geb. Bielesch, keine Kinder

Berufliche Tätigkeiten

seit 02/08	Gebietsleiter West, Netafim Deutschland GmbH
10/04 – 12/07	wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Gemüsebau der Forschungsanstalt Geisenheim
01/04 – 09/04	Produktionsleiter, Fa. HAVITA Frischsalate GmbH, Dannstadt-Schauernheim

Fachhochschulstudium

10/99 – 09/03	Gartenbaustudium an der FH Wiesbaden (Standort Geisenheim)
03/03 – 09/03	Diplomarbeit: Einfluss der Bewässerung auf ausgewählte Qualitäts- und Bodenkennwerte bei Bleichspargel in der Ernteperiode

Zivildienst

07/98 – 08/99	Pfarramt Kirche und Dorf Kaiserslautern als landwirtschaftlicher Betriebshelfer
---------------	---

Schulausbildung

08/84 – 06/88	Grundschule Bellheim
08/88 – 06/98	Eduard-Spranger-Gymnasium Landau/ Pfalz

Erklärung

Hiermit erkläre ich eidesstattlich, dass die vorliegende Dissertation selbstständig verfasst und keine anderen, als die angegebenen Hilfsmittel verwendet wurden.

Sebastian Weinheimer